

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

ANGELO SAMUEL JUNQUEIRA

**Avaliação da condição de via férrea por meio de vagão instrumentado e carro controle:
estudo de caso na Estrada de Ferro Vitória-Minas**

São Paulo

2024

ANGELO SAMUEL JUNQUEIRA

**Avaliação da condição de via férrea por meio de vagão instrumentado e carro controle:
estudo de caso na Estrada de Ferro Vitória-Minas**

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Mestre em Ciências

Área de Concentração: Engenharia de
Transportes

Orientadora: Profa. Dra. Rosângela dos Santos
Motta

São Paulo
2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Junqueira, Angelo Samuel

Avaliação da condição de via férrea por meio de vagão instrumentado e carro controle: estudo de caso na Estrada de Ferro Vitória-Minas / A. S.

Junqueira -- versão corr. -- São Paulo, 2024.

159 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Via férrea 2.Geometria 3.Vagão instrumentado 4.Big data 5.Carro controle I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

Nome: JUNQUEIRA, Angelo Samuel

Título: Avaliação da condição de via férrea por meio de vagão instrumentado e carro controle: estudo de caso na Estrada de Ferro Vitória-Minas

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr.

Instituição

Julgamento

Prof. Dr.

Instituição

Julgamento

Prof. Dr.

Instituição

Julgamento

Agradecimentos

Caros amigos, colegas de trabalho, professores, equipe do projeto, minha orientadora, pai, mãe, irmã e avô.

Gostaria de expressar a minha gratidão a todos vocês pela ajuda e apoio que me acompanharam durante a jornada para a conclusão do meu trabalho. Cada um de vocês contribuiu de forma singular para o sucesso desse projeto.

Quero agradecer à minha família. À minha irmã Gabriela, ao meu pai Angelo e minha mãe Anair, pelo apoio incondicional, a confiança e o incentivo constante foram fundamentais para que eu pudesse dedicar tempo e esforço nesse projeto. Sinto-me grato por ter essa oportunidade. Sem o apoio de vocês, eu não teria conseguido chegar até aqui.

Ao meu falecido avó Antônio Vieira, pelo amor incondicional, preocupação e incentivo ao estudo.

Aos professores, quero agradecer por todo o conhecimento que compartilham, suas lições inspiradoras e sua orientação em momentos de dúvida e incerteza.

À professora Liedi Bernucci, pela confiança, incentivo, carinho e grandes ensinamentos não apenas no aspecto profissional, mas como pessoa.

À minha orientadora Rosângela dos Santos Motta, quero agradecer pela orientação, pelas sugestões e críticas construtivas, pela disponibilidade e comprometimento em me orientar ao longo do trabalho. Suas orientações precisas, críticas construtivas e incentivos foram essenciais para o sucesso desse projeto. Sua capacidade de nos motivar e nos inspirar é uma habilidade única e fundamental para a formação acadêmica e profissional.

À Flaviane Vallejo pelo incentivo, inspiração e a sua orientação ao longo da minha jornada na graduação e ter desempenhado um papel fundamental no meu crescimento acadêmico e profissional.

À equipe do projeto, Thales Costa, Pedro Correa, Osvaldo Gogliano, Tony Dias, Fernando Cossetin e Jeaneth Machicao, gostaria de agradecer todo o trabalho árduo e dedicação que tiveram para tornar este projeto uma realidade. Nada disso seria possível sem a colaboração de cada um de vocês.

À grande família do LTP beer: Ana Flopes, Jonathan, Paulo, Zila, Laura, Leidy, Lucas, Andréia, Guilherme, Yanna, Beatrice, Julia, Gustavo, João, Raíssa, André. Um enorme sentimento de gratidão pelo acolhimento, companheirismo, dos grandes momentos e eternas risadas juntos. Muito obrigado a todos.

Aproveito para agradecer especialmente à Vale, empresa financiadora do projeto, pelo apoio e confiança depositados em mim e na minha equipe. Principalmente ao Luciano Cassaro e Luciano Oliveira, sem a experiência, atenção e auxílios oferecidos, esse projeto não teria sido possível.

À Diomária Santos, ao Lucas e ao Erasmo, sempre cuidados e atenciosos para ajudar com qualquer problema. Meus singelos agradecimentos

Por fim, a equipe de ferrovias do LTP: Edson e Robson. Sempre prestativos, empenhados e com muita energia para ensinar e fazer piadas.

Mais uma vez, muito obrigado a todos. Vocês foram fundamentais para que eu pudesse alcançar essa importante conquista em minha vida.

“A engenharia civil não é apenas sobre construir estruturas, é sobre construir sociedades, criar progresso e trazer melhorias à qualidade de vida das pessoas.”

(James Rouse)

RESUMO

JUNQUEIRA, A. S. **Avaliação da condição de via férrea por meio de vagão instrumentado e carro controle: estudo de caso na Estrada de Ferro Vitória-Minas**. 2024. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024

A gestão de manutenção ferroviária estabelece limites que classificam os segmentos da via permanente, de acordo com as necessidades de monitoramento ou intervenção, visando garantir a segurança, o conforto e o pleno funcionamento da ferrovia. Esses limites podem se relacionar com parâmetros geométricos da via férrea, passíveis de medição automatizada (por meio de equipamentos de inspeção direta, como o carro controle, inspeção indireta, como o vagão instrumentado), ou por inspeção manual, realizada *in loco*.

O carro controle é um equipamento já estabelecido no campo técnico, porém seu custo de aquisição é elevado e seu uso requer restrições nas operações da via para conduzir as inspeções. Nesse contexto, muitas ferrovias adotam vagões comerciais equipados com sensores para medições, eliminando a necessidade de ajustes nas operações da via e permitindo medições em condições reais de uso. Esses equipamentos têm o propósito de registrar o movimento do veículo durante a viagem, identificando possíveis irregularidades na via.

A Estrada de Ferro Vitória-Minas (EFVM), operada pela VALE, utiliza o carro controle (CC) para monitorar a via. Contudo, com o objetivo de melhorar as análises e previsão de desempenho a VALE está implantando uma tecnologia adicional na EFVM, o vagão instrumentado (VI).

Este instrumento de inspeção ainda é pouco conhecido no Brasil, e este estudo se propõe a analisar os parâmetros relacionados às condições da via obtidos pelo VI em comparação com os dados do CC. O objetivo é identificar possíveis correlações entre esses dados, visando interpretá-los e validar seu uso em avaliações da qualidade da via. Com base na fundamentação teórica e em estudo de caso conduzido, a importância e os benefícios do uso do conhecimento da ciência de dados nas ferrovias ficaram claras.

Sugere-se a implementação de uma rotina de inspeção utilizando instrumentos embarcados em veículos comerciais da ferrovia. Isso visa a obtenção de dados em condições reais de uso, com

uma frequência de inspeção mais elevada, podendo ser associada ao uso de um veículo de avaliação de via (como o CC) e a adoção de um índice de qualidade global apropriado.

Para a gerência de manutenção, é fundamental realizar essa estratégia técnica, envolvendo a definição de limites para uma variedade de equipamentos. Isso inclui conduzir inspeções, determinar a priorização de atividades, estabelecer níveis de monitoramento (de atenção a alarme) e níveis de abrangência (pontual, por elemento, ou *entre house* - EH). Essa pesquisa pode, no futuro, contribuir para a atribuição de níveis de severidade e a detecção antecipada de possíveis problemas na via no âmbito da previsão de desempenho, sem a necessidade direta de inspeções *in loco*, além de apoiar a otimização das estratégias e planejamento de intervenções na ferrovia.

Palavras-chave: Via férrea. Geometria. *Big data*. Vagão instrumentado. Carro controle.

ABSTRACT

JUNQUEIRA, A. S. **Evaluation of the condition of railway track using instrumented wagon and track recording car: a case study on the Vitória-Minas Railway.** 2024. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024

Railway maintenance management establishes limits that classify sections of the railway track based on monitoring or intervention needs. The goal is to ensure the safety, comfort, and full operation of the railway. These limits can pertain to the geometric parameters of the railway, which are subject to automated measurement (via direct inspection equipment like the control car or indirect inspection, such as the instrumented wagon) or manual inspection conducted on-site.

The track recording car is a well-established equipment in the technical field. However, its acquisition cost is high, and it requires operational restrictions on the track to perform inspections. In this context, many railways adopt commercial wagons equipped with sensors for measurements, eliminating the need for adjustments to railway operations and allowing measurements under real usage conditions. This equipment has the purpose of recording the vehicle's motion during the journey and identifying possible irregularities on the railway.

The Estrada de Ferro Vitória-Minas (EFVM), operated by VALE, uses the track recording car (CC) to monitor the railway. However, with the goal of improving the analyses and performance forecasting, VALE is implementing additional technology on the EFVM: the Instrumented Wagon (VI).

This inspection instrument is still relatively unknown in Brazil, and this study aims to analyze the parameters related to railway conditions obtained by the VI in comparison to CC data. The objective is to identify possible correlations between these data, interpret them and validate their use in railway quality assessments. Based on the theoretical foundation and a conducted case study, the importance and benefits of using data science knowledge in railways have become evident.

It is suggested to implement an inspection routine using instruments installed on commercial railway vehicles. This aims to obtain data under real usage conditions with a higher inspection frequency, which can be associated with the use of a railway evaluation vehicle (such as the CC) and the adoption of an appropriate global quality index.

For maintenance management, it is essential to implement this technical strategy, which involves defining limits for various equipment., prioritizing activities, establishing monitoring levels (from attention to alarm), and coverage levels (specific spot, by element, entre house - EH).

This research may, in the future, contribute to assigning severity levels, early detection of potential railway issues, and optimizing and planning railway intervention strategies.

Keywords: Railway track. Geometry. Big data. Instrumented wagon. Track recording car.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Variação da bitola (x-y)	29
Figura 2 – Desnívelamento longitudinal	30
Figura 3 – Desnívelamento transversal	30
Figura 4 – Representação do desvio (y) para duas seções transversais (i e i+1) em um plano definido na via, onde A, B, C e D são pontos na superfície de rolamento dos trilhos utilizados para determinar o empeno.....	32
Figura 5 - Desenho esquemático representando o desalinhamento conforme critério da (ABNT NBR 16387, 2016).....	33
Figura 6 – Representação da superelevação.....	34
Figura 7 – Movimentos do vagão	36
Figura 8 – Movimento longitudinal do vagão	36
Figura 9 – Representação do movimento oscilatório de rolagem combinado com rolagem lateral	37
Figura 10 – Rolagem harmônica dos vagões.....	38
Figura 11 – Representação do modo de oscilação: guinada e lateral	39
Figura 12 – Movimento de lacet (<i>hunting</i>).....	39
Figura 13 – Exemplo de equipamento de inspeção carro controle (modelo Plasser) e seus respectivos sistemas, parâmetros e aplicações	41
Figura 14 – Exemplo de laudo de inspeção com carro controle.....	42
Figura 15 – Equipamento de inspeção Vagão instrumentado	44
Figura 16 – Exemplo representativo do posicionamento de um acelerômetro e processo de leitura dos sensores	45
Figura 17 – Representação do peso suspenso e não suspenso do vagão	45
Figura 18 – Eixos de movimentação livre dos vagões	46
Figura 19 – Algoritmo para cálculo do parâmetro <i>BodyRock</i>	47
Figura 20 – Algoritmo para cálculo do parâmetro <i>Suspention Travel</i>	48
Figura 21 – Algoritmo para cálculo do parâmetro <i>Bounce</i>	49
Figura 22 – Algoritmo para cálculo do parâmetro de aceleração.....	50
Figura 23 – Ciclo de vida dos dados conforme passos definidos Dehkyar (2016): Formulação de perguntas; Coleta/Aquisição de dados; Limpeza de dados; Modelagem de dados;	

Análise de dados; Visualização e Apresentação de Resultados; Análise de Resultados.....	51
Figura 24 – Diagrama representativo das dimensões associadas para realização da modelagem utilizando algoritmos de agrupamentos de dados.....	60
Figura 25 – Exemplo da aplicação do algoritmo de agrupamento <i>k-means</i> (para $k = 4$) para um determinado conjunto de dados	60
Figura 26 – Explicação de atribuição de rótulos aos agrupamentos.....	61
Figura 27 – Mapa da Estrada de Ferro Vitória-Minas.....	65
Figura 28 – Principais ferramentas e bibliotecas em Python utilizadas.	68
Figura 29 – <i>Workflow</i> aplicado para estudo	70
Figura 30 – (a) Gráfico <i>boxplot</i> , (b) gráfico de histograma vertical e (c) gráfico de densidade para o atributo aceleração, em g, de todas as viagens analisadas que foram realizadas pelo VI em 2020	75
Figura 31 – (a) Gráfico <i>boxplot</i> , (b) gráfico de histograma vertical e (c) gráfico de densidade para o atributo <i>BodyRock</i> de todas as viagens analisadas que foram realizadas pelo VI em 2020	75
Figura 32 – Representação gráfica em mapa de calor da correlação de Pearson para os atributos principais do VI	76
Figura 33 – Gráfico de mapa de calor para a distribuição de dados para os diferentes <i>datasets</i>	78
Figura 34 – Tela inicial do <i>dashboard</i> programada em Python utilizando a ferramenta <i>Streamlit</i>	79
Figura 35 – Distribuição das anomalias registradas por maquinistas e inspeções visuais no período do estudo.....	80
Figura 36 – (a) Gráfico de barras da distribuição de ocorrências de geometria na via ao longo de 2020 por mês, e (b) gráfico de distribuição de anomalias registradas na plataforma ao longo de 2020 por mês.....	81
Figura 37 – Mapa de localização dos pluviômetros instalados ao longo da EFVM pela VALE em vermelho e pelo Cemaden em amarelo.....	82
Figura 38 – Gráfico em linha da média mensal de precipitação entre 2020 e 2021 dos pluviômetros do Cemaden	82
Figura 39 – Recorte do gráfico em barras para os elementos da via com maior quantidade de anomalias constatadas no ano.....	83

Figura 40 - Esquema ilustrativo da estratégia de definição e escolha do trecho para o estudo de caso	84
Figura 41 - Mapa de georreferenciamento do Trecho 1 em estudo.....	84
Figura 42 – Distribuição de ocorrências por mês no Trecho 1 no período de análise.....	85
Figura 43 – Histogramas para os parâmetros Aceleração (a), <i>Suspention Travel</i> (b), <i>BodyRock</i> (c), <i>Bounce</i> (d) e Velocidade (e) da viagem 1 do VI.....	87
Figura 44 – <i>Boxplot</i> e pontos de distribuição dos registros para os parâmetros <i>Bounce</i> , <i>BodyRock</i> , <i>Suspention Travel</i> e Aceleração da viagem 1 do VI	88
Figura 45 – <i>Boxplot</i> e pontos de distribuição dos registros para o parâmetro Velocidade da viagem 1 do VI no Trecho 1	89
Figura 46 – Mapa de calor da correlação de Pearson para os atributos principais do VI para a viagem 1 no Trecho 1	90
Figura 47 – Medidas descritivas das viagens 1, 7 e 11 do Trecho 1 para os parâmetros Aceleração, <i>Suspention Travel</i> , <i>BodyRock</i> e <i>Bounce</i>	91
Figura 48 – Mapa da distribuição dos registros georreferenciados do VI para a viagem 1 (a), viagem 7 (b) e viagem 11 (c) ao longo do Trecho 1.....	93
Figura 49 – Dispersão de pontos para o elemento Curva 2 localizado dentro do Trecho 1 em LRS para as viagens 1,7 e 11.....	94
Figura 50 – Dispersão dos pontos ao longo da extensão do elemento Curva 5 do Trecho 1 em LRS para as viagens 1, 7 e 11.....	95
Figura 51 – Distribuição das viagens realizadas pelo CC para o Trecho 1 ao longo de 2020.	96
Figura 52 – Gráfico do índice de qualidade CoSD segundo o método (EN 13848-6,2016), em milímetros. Onde J (junta isolada colada), PT (ponte), T (travador).....	98
Figura 53 – Desvio padrão do alinhamento segundo o método EN 13848(2008), em milímetros. Onde J (junta isolada colada), PT (ponte), T (travador) e em verde a linha da referência para o limite para atenção definido pela própria normativa europeia .	101
Figura 54 – Pontos onde recomenda-se atenção devido ao primeiro nível de restrição de velocidade previsto pela normativa	103
Figura 55 – Acumulado de precipitação para os últimos três dias antes das inspeções realizadas pelo CC em julho, setembro e novembro. Identificado pelo quadrado vermelho a região estudada	105

Figura 56 – Acumulado de precipitação para os últimos dez dias antes das inspeções realizadas pelo CC em julho, setembro e novembro. Identificado pelo quadrado vermelho a região estudada	105
Figura 57 – Principais marcos na linha do tempo referente ao elemento Curva 2 ao longo do ano de 2020.....	106
Figura 58 – Inspeção realizada em campo na Curva 2 do Trecho 1, constatando princípio de desnivelamento na via	107
Figura 59 - Identificado a troca recente de dormente quebrado no elemento Curva 2 para o Trecho 1 durante a inspeção de campo de outubro	108
Figura 60 – Constatação da presença de finos na superfície da superestrutura lastreada durante a inspeção visual na Curva 2 do Trecho 1	109
Figura 61 – Mapa de calor da correlação entre os principais atributos do CC e VI para as viagens de novembro e agosto para os mesmos pontos georreferenciados na Curva 2.....	110
Figura 62 – Principais marcos na linha do tempo referente ao elemento Curva 5 ao longo do ano de 2020.....	111
Figura 63 – Inspeção visual para a entrada da Curva 5, onde verificou-se a presença de alguns dormentes quebrados	112
Figura 64 – Inspeção visual para a saída da Curva 5, onde foi identificado a contaminação do lastro por finos.	113
Figura 65 – Mapa de calor da correlação entre os principais atributos do CC e VI para as viagens de novembro e agosto para os mesmos pontos georreferenciados na Curva 5.....	114
Figura 66 – Representação de pontos do VI em clusters, cada <i>cluster</i> correspondendo a uma cor distinta.	114
Figura 67 – <i>Export</i> em <i>Kmz</i> da ferramenta DataViz após a aplicação do modelo de <i>clustering</i> dos dados das viagens do VI para um segmento experimento, onde foram agrupados em 4 cores distintas representando diferentes níveis de severidade da via	115
Figura 68 – Representação dos níveis de severidade em relação a sua associação com as condições encontradas na via	116
Figura 69 - <i>Cluster</i> correlacionado a maior severidade para a viagem de agosto	117
Figura 70 – <i>Boxplot</i> para o atributo <i>BodyRock</i> para todas as viagens de 2020.....	132
Figura 71 – Densidade para o atributo <i>BodyRock</i> para todas as viagens de 2020.....	132
Figura 72 – Distribuição da frequência dos dados do atributo <i>BodyRock</i> para todas as viagens de 2020.	133

Figura 73 – <i>Boxplot</i> para o atributo <i>Bounce</i> para todas a viagens de 2020.....	133
Figura 74 – Densidade para o atributo <i>Bounce</i> para todas as viagens de 2020.....	134
Figura 75 – Distribuição da frequência dos dados do atributo <i>Bounce</i> para todas as viagens de 2020.	134
Figura 76 – <i>Boxplot</i> para o atributo <i>Suspention Travel</i> para todas a viagens de 2020.....	135
Figura 77 – Densidade para o atributo <i>Suspention Travel</i> para todas as viagens de 2020....	135
Figura 78 – Distribuição da frequência dos dados do atributo <i>Suspention Travel</i> para todas as viagens de 2020.	135
Figura 79 – Histogramas para os parâmetros Aceleração (a), <i>Suspention Travel</i> (b), <i>BodyRock</i> (c), <i>Bounce</i> (d) e Velocidade (e) da viagem 7 do VI.	136
Figura 80 – <i>Boxplot</i> e pontos de distribuição dos registros para os parâmetros <i>Bounce</i> , <i>BodyRock</i> , <i>Suspention Travel</i> e Aceleração da viagem 7 do VI.	137
Figura 81 – Mapa de calor da correlação de Pearson para os atributos principais do VI para a viagem 7 no Trecho 1.	138
Figura 82 – Histogramas e para os parâmetros Aceleração (a), <i>Suspention Travel</i> (b), <i>BodyRock</i> (c), <i>Bounce</i> (d) e Velocidade (e) da viagem 11 do VI.....	139
Figura 83 – <i>Boxplot</i> e pontos de distribuição dos registros para os parâmetros <i>Bounce</i> , <i>BodyRock</i> , <i>Suspention Travel</i> e Aceleração da viagem 7 do VI.	140
Figura 84 – Mapa de calor da correlação da ordem de posto de Pearson para a viagem 11 no Trecho 1.....	141
Figura 85 – Desvio padrão da bitola segundo o método (EN 13848,2008), em milímetros. Onde J (junta isolada colada), PT (ponte), T (travador).....	143
Figura 86 –Desvio padrão do alinhamento segundo o método (EN 13848,2008), em milímetros. Onde J (junta isolada colada), PT (ponte), T (travador).....	144
Figura 87 – Desvio padrão da média do nivelamento longitudinal do trilho esquerdo e direito segundo o método EN 13848 (2008), em milímetros. Onde J (junta isolada colada), PT (ponte), T (travador) e em verde a linha de referência para o intervalo limite definido em normativa europeia.	145
Figura 88 – Taxa normalizada dos parâmetros geométricos para a Curva 5, em milímetros, com faixas branca e cinza a cada 1 desvio padrão	147
Figura 89 – Bitola para a Curva 5, em milímetros, com referências aos limites estabelecidos pela NBR 16387 (2016) para bitola métrica representado em faixas da cor azul ao	

	cinza escuro, sendo primeiro nível a faixa de maior velocidade autorizada (azul) até menor (cinza escuro)	148
Figura 90	– Variação de bitola para a Curva 5, em milímetros, com referências aos limites estabelecidos pela NBR 16387 (2016) para bitola métrica representado em faixas da cor azul ao cinza escuro, sendo primeiro nível a faixa de maior velocidade autorizada (azul) até menor (cinza escuro)	149
Figura 91	– Nivelamento transversal em corda de 2m para a Curva 5, em milímetros, com seus limites estabelecidos conforme a NBR 16387 (2016) para bitola métrica representado em faixas da cor azul ao cinza escuro, sendo primeiro nível a faixa de maior velocidade autorizada (azul) até menor (cinza escuro)	149
Figura 92	– Nivelamento transversal em corda de 10m para a Curva 5, em milímetros, com referência aos limites estabelecidos conforme a NBR 16387 (2016) para bitola métrica representado em faixas da cor azul ao cinza escuro, sendo primeiro nível a faixa de maior velocidade autorizada (azul) até menor (cinza escuro)	149
Figura 93	– Média do nivelamento longitudinal do trilho esquerdo e direito para a Curva 5, em milímetros, com referência os limites estabelecidos pela NBR 16387 (2016) para bitola métrica representado em faixas da cor azul ao cinza escuro, sendo primeiro nível a faixa de maior velocidade autorizada (azul) até menor (cinza escuro).....	150
Figura 94	– Superelevação e curvatura da Curva 5, em milímetros, em referência aos limites estabelecidos conforme NBR 16387 (2016) para bitola métrica.....	150
Figura 95	– Mapa de calor de correlação para os parâmetros do CC na Curva 5	151
Figura 96	– Gráfico da taxa normalizada dos parâmetros geométricos da Curva 2, em milímetros, com faixas branca e cinza a cada 1 desvio padrão	153
Figura 97	–Bitola para a Curva 2, em milímetros, com referência os limites estabelecidos conforme NBR 16387 (2016) para bitola métrica representado em faixas da cor azul ao cinza escuro, sendo primeiro nível a faixa de maior velocidade autorizada (azul) até menor (cinza escuro).....	154
Figura 98	– Variação de bitola para a Curva 2, em milímetros, com referências aos limites estabelecidos pela NBR 16387 (2016) para bitola métrica representado em faixas da cor azul ao cinza escuro, sendo primeiro nível a faixa de maior velocidade autorizada (azul) até menor (cinza escuro)	155
Figura 99	– Nivelamento transversal em corda de 2m para a Curva 2, em milímetros, com referência aos limites estabelecidos conforme a NBR 16387 (2016) para bitola	

	métrica representado em faixas da cor azul ao cinza escuro, sendo primeiro nível a faixa de maior velocidade autorizada (azul) até menor (cinza escuro)	155
Figura 100 – Nivelamento transversal em corda de 10m para a Curva 2, em milímetros, com referência aos limites estabelecidos conforme a NBR 16387 (2016) para bitola métrica representado em faixas da cor azul ao cinza escuro, sendo primeiro nível a faixa de maior velocidade autorizada (azul) até menor (cinza escuro)		156
Figura 101 – Alinhamento em corda de 10 m para a Curva 2, em milímetros, com referência aos limites estabelecidos conforme a NBR 16387 (2016) para bitola métrica representado em faixas da cor azul ao cinza escuro, sendo primeiro nível a faixa de maior velocidade autorizada (azul) até menor (cinza escuro)		156
Figura 102 – Superelevação e curvatura em milímetros para Curva 2 com referência aos limites estabelecidos conforme a NBR 16387 (2016) para bitola métrica		157
Figura 103 – Mapa de calor para correlação entre os atributos do CC para a Curva 2		159

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplo quantitativo de sistema de sensores em VI e sua respectiva localização em um vagão tipo GDE.	43
Tabela 2 – Levantamento de estudos realizados fazendo o uso de equipamentos de inspeção indireta da via	56
Tabela 3 – Atributos analisados para os equipamentos	66
Tabela 4 – Características dos <i>datasets</i> empregados.....	68
Tabela 5 – Inspeções realizadas pelo VI ao longo do ano de 2020.....	73
Tabela 6 – Tabela descritiva para as anomalias identificadas ao longo de 2020 para o Trecho 1	85
Tabela 7 – Registros de ocorrências filtrado para o elemento Curva 2 dentro do Trecho 1 para o ano de 2020.....	104
Tabela 8 – Registros de ocorrências filtrado para o elemento Curva 5 dentro do Trecho 1 para o ano de 2020.....	111
Tabela 9 – Resultados do algoritmo de clusterização empregado pela ferramenta <i>DataMap</i> para os dados provenientes do VI levantados durante o ano de 2020 para a situação da via no mês de agosto.....	116
Tabela 10 – Resumo dos elementos identificados como ponto de atenção para cada método aplicado no estudo, avaliando se foi identificado alguma ocorrência para o ano de 2020	118

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	OBJETIVOS.....	26
1.2	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	27
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
2.1	GEOMETRIA DA VIA FÉRREA	28
2.1.1	Alargamento ou estreitamento de bitola.....	29
2.1.2	Desnivelamento longitudinal e desalinhamento transversal.....	29
2.1.3	Empenamento (ou torção)	31
2.1.4	Desalinhamento	32
2.1.5	Deficiência de Superelevação.....	33
2.2	DINÂMICA DE OSCILAÇÃO DO VAGÃO NA VIA	34
2.3	EQUIPAMENTOS DE INSPEÇÃO DA VIA FÉRREA.....	39
2.3.1	Carro controle	40
2.3.2	Vagão instrumentado	42
2.4	CIÊNCIA DOS DADOS	50
2.5	AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA VIA	52
2.6	MANUTENÇÃO DA VIA.....	62
3	ESTUDO DE CASO	64
3.1	OBJETO DE ESTUDO	64
3.2	MATERIAIS E MÉTODOS	65

4	RESULTADOS.....	73
5	CONCLUSÃO E COMENTÁRIOS.....	119
	REFERÊNCIAS	123
	APÊNDICE A – ANÁLISE DOS DADOS BRUTOS DE TODAS AS VIAGENS DO VI	
	132	
	APÊNDICE B – ANÁLISE DOS DADOS VIAGENS 7 E 11 DO VI PARA O TRECHO 1	
	136	
	APÊNDICE C – GRÁFICOS DADOS CALCULADOS PARA O MÉTODO SD.....	142
	APÊNDICE D – GRÁFICOS DADOS CC PARA O SEGMENTO	147

1 INTRODUÇÃO

A distribuição da logística de transportes no Brasil demonstra a predominância do modal rodoviário como o principal meio de escoamento de produtos e serviços em todo o território nacional. A malha rodoviária possui uma densidade de 25,1 km/1.000 km², que é muito maior quando comparada com os outros modais, como o ferroviário, que possui cerca de 3,4 km/1.000 km². A rede ferroviária é bastante reduzida no território nacional, apesar do grande potencial que ela apresenta, devido ao Brasil ser considerado um país com dimensões continentais (IBGE, 2019; CNT, 2021; ONTL, 2021).

Existem altas demandas de transporte de minérios no Brasil, principalmente minério de ferro e carvão, além de produtos agrícolas, como soja e milho. Essas demandas podem ser atendidas de maneira mais rápida, segura e eficiente por meio de ferrovias (CNT, 2020; WAN *et al.*, 2021), porém, o país enfrenta uma ausência de corredores ferroviários para escoamento da produção. Muitas das linhas ferroviárias que compõem o sistema ferroviário brasileiro têm uma história de mais de um século de operação, e a questão central não reside em sua idade, mas sim na ausência de manutenção adequada ao longo desse período. Segundo dados da CNT (2021), o Brasil possui cerca de 31.000 km de extensão de linhas e ramais que compõem o transporte ferroviário de carga, porém somente cerca de 7.000 km se encontram em plena operação, de acordo com a ONTL (2021). Entretanto, apesar da malha em pleno uso representar um percentual baixo em relação ao total (aproximadamente 23%), o volume transportado em 2020 chegou a quase 490 milhões de toneladas úteis, vindo em ascendência nas últimas décadas (CNT, 2021b).

Dentro do contexto colocado, é essencial garantir-se o funcionamento de forma ininterrupta das ferrovias existentes para permitir escoamentos dos produtos e serviços que dependem diretamente deste modal. Para tal, devem-se realizar inspeções periódicas em toda extensão da linha férrea, com o intuito de se identificar, se possível de forma antecipada, possíveis distúrbios e repará-los.

Tendo em vista desafios citados, a Quarta Revolução Industrial, também conhecida como Indústria 4.0, está redefinindo profundamente as abordagens e as estratégias das indústrias. A Indústria 4.0 destaca-se pela crescente automação, utilização da Internet das Coisas (IoT),

criação de gêmeos digitais, aplicação de computação cognitiva, integração da computação em nuvem e implementação de inteligência artificial (IA). Esses mecanismos envolvem aprendizado, lógica e correção automáticos, e encontram aplicação em diversos processos industriais, como manufatura inteligente, gerenciamento e aprimoramento de desempenho, aumento da visibilidade das operações e otimização do planejamento da linha de produção. Em essência, a Indústria 4.0 representa uma nova realidade em que a tecnologia industrial se torna cada vez mais eficiente, contribuindo para o surgimento de uma cadeia de valor inteligente, integrada e ágil (FIA, 2020; PORTER; HEPPELMANN, 2015; SCHUMACHER; EROL; SIHN, 2016; SCHWAB, 2016)

O conceito de Indústria 4.0 está intimamente relacionado com a IoT. O conceito da Internet das Coisas é possibilitar a comunicação entre um objeto e outro, utilizando uma variedade de dispositivos e usuários com fácil acesso e interação simplificada. De fato, a IoT pode oferecer muitas vantagens no gerenciamento e otimização dos serviços tradicionais de manutenção, como automação/monitoramento das condições ferroviárias por meio de diferentes sensores e diferentes dispositivos de inspeção (ZANELLA *et al.*, 2014).

A indústria ferroviária está avançando na adoção desse novo modelo de indústria, em que os novos trens são projetados e fabricados de acordo com as metodologias da Indústria 4.0, mas deve-se considerar que a maioria dos trens em operação não foram concebidos com essa filosofia tecnológica, portanto, precisam ser adaptados a ela (BUSTOS *et al.*, 2021).

Conforme Laiton-Bonadiez *et al.* (2022), as tecnologias usadas na Indústria 4.0 que podem ser aplicadas na ferrovia para enfrentar os desafios mencionados anteriormente incluem a inteligência artificial, computação em nuvem, *big data*, IoT, cibersegurança, simulação, visão computacional e realidade virtual.

Ainda segundo Laiton-Bonadiez *et al.* (2022), existem três domínios possíveis para a aplicação dessas tecnologias no setor ferroviário: monitoramento; decisão e planejamento; comunicação e segurança. O primeiro deles é o domínio de monitoramento, onde as tecnologias têm o foco em acompanhar a infraestrutura ferroviária. Isso abrange tanto ativos, como a via e o material rodante, quanto aspectos como a poluição ambiental e sonora, entre outros. O uso em tempo real dessas tecnologias contribui para aumentar a confiabilidade, disponibilidade e segurança do sistema ferroviário, reduzindo os custos de manutenção e prevenindo acidentes ferroviários.

Para essa finalidade, é possível aproveitar-se um sistema de sensores sem fio (IoT), juntamente com um aplicativo de servidor web para a visualização das informações levantadas, conforme demonstrado no trabalho de Motta *et al.* (2023). Isso permite a criação de um sistema de avaliação em tempo real, possibilitando a comunicação entre trilhos, trens e salas de controle para a gestão e o gerenciamento de ativos. Além disso, fornece acesso a um amplo banco de dados e automação de processos. Essa abordagem pode ser empregada não apenas para aprimorar o desempenho dos serviços, mas também para a realização de manutenção preventiva (LAITON-BONADIEZ *et al.*, 2022; SONAR *et al.*, 2022).

Já no domínio de técnicas de decisão e planejamento, há estudos voltados para a otimização do transporte ferroviário e otimização de custos. Laiton-Bonadiez *et al.* (2022) afirmam que as aplicações neste domínio apresentam duas estratégias: a primeira visa obter percepções a partir de dados ferroviários, que antes estavam apenas armazenados em bancos de dados, enquanto a segunda foca no uso deles em tempo real. Eles são obtidos por meio de dispositivos IoT instalados em locomotivas, vagões, carros ou em estações de trem, com a estratégia introduzida no domínio de monitoramento. Posteriormente, esses dados podem ser usados em algoritmos de *machine learning* (ML), que se concentram principalmente na otimização de processos de gestão ferroviária, por meio de análise de dados, ou na otimização do fluxo de tráfego da ferrovia usando a inteligência artificial (IA) (LAITON-BONADIEZ *et al.*, 2022; LIU; WANG; LUO, 2019).

Por outro lado, o terceiro domínio mencionado por Laiton-Bonadiez *et al.* (2022), o da comunicação e segurança, que não será objeto desta pesquisa, foca sua atividade na segurança ferroviária, nos sistemas de segurança e nos problemas de conectividade das viagens.

O domínio que receberá maior ênfase nesta pesquisa é o do monitoramento, cujos efeitos podem impactar diretamente o segundo domínio, de decisão e planejamento. Historicamente, o processo de inspeção da via costumava depender principalmente de profissionais de campo para realizar inspeção visual. No entanto, como mencionado anteriormente, com o desenvolvimento tecnológico e o aprimoramento dos equipamentos, as formas de se coletarem e se armazenarem os dados obtidos melhoraram (LI *et al.*, 2016), sendo que a auditoria de forma automatizada pode ser feita com o uso de veículos de inspeção, como o carro controle.

O carro controle (CC) é um equipamento que requer um grande investimento para sua aquisição, exige a ocupação exclusiva da via e necessita de uma operação assistida com uma

equipe a bordo do veículo. Deste modo, a inspeção embarcada não assistida, como a realizada em um VI, torna-se interessante, uma vez que é possível realizarem-se avaliações em condições reais de uso da ferrovia, como carga e velocidade, sem prejudicar as operações comerciais. No entanto, para a implementação dessa técnica de inspeção embarcada, o desafio está em se desenvolver um dispositivo com um nível eficaz de percepção da via, equipado com sensores capazes de resistir ao ambiente severo do transporte de minérios, por exemplo (como sujeira, vibração e impactos associados à operação de transporte de carga). Além disso, é necessário se desenvolver um ambiente ou servidor que seja capaz de lidar com todas as etapas, desde a aquisição dos dados na plataforma, passando pela transmissão das informações, até a visualização na central de comando da ferrovia (DIEGO, 2017; LAITON-BONADIEZ *et al.*, 2022).

Adicionalmente, no que diz respeito à comunicação do veículo, o servidor deve ser capaz de lidar com uma grande quantidade de dados, uma vez que os veículos instrumentados podem percorrer toda a extensão da linha férrea diariamente. Isso difere significativamente dos levantamentos realizados com o CC, que geralmente passam na via em intervalos de alguns meses, por exemplo, gerando menor volume de dados.

Os dados relativos à condição da via, coletados a partir das diversas inspeções na linha, precisam ser agrupados, processados e armazenados para que informações sobre o progresso de falhas e planejamento de manutenção possam ser obtidos, quando necessário. Isso é especialmente relevante para a predição de distúrbios na via, além de rastreamento e identificação de variações na geometria da via, por exemplo. A análise dos dados dos parâmetros geométricos desempenha um papel fundamental na gestão ferroviária, pois permite diagnosticar o nível de degradação, identificando os trechos em pior estado para, em seguida, priorizar e dimensionar os serviços e ações de manutenção.

As vias tipo *heavy haul* são mais suscetíveis a uma deterioração acelerada, o que pode comprometer parcial ou totalmente o seu funcionamento, dependendo da gestão de manutenção. Situações de paralisação, mesmo que parciais, resultam em aumento dos custos de transporte, afetando o preço final dos bens e serviços. Essa problemática impacta negativamente a competitividade dos produtos transportados pela ferrovia, tanto em um cenário de mercado nacional quanto internacional (CORRÊA JUNIOR, 2001).

Uma das variáveis que pode afetar significativamente o custo final do frete de um produto é a condição das vias utilizadas. Quando uma ferrovia se encontra em más condições, isso também pode aumentar consideravelmente o risco de acidentes, tornando a atividade de transporte mais lenta e menos segura. Como resultado, outra variável importante é afetada: o prazo de entrega. Um sistema de transporte eficiente é capaz de cumprir rigorosamente os prazos estabelecidos, com o objetivo de reduzir os custos logísticos, sabendo-se que produtos que não são entregues dentro do prazo impactam diretamente na necessidade de armazenamento e na reprogramação das operações da empresa (CORRÊA JUNIOR, 2001).

As ferrovias brasileiras desempenham um papel crucial no transporte de produtos e serviços, tornando essencial a garantia de seu funcionamento contínuo para manter a competitividade dos produtos transportados por essa modalidade. Nesse contexto, a manutenção preditiva e eficaz dos ativos ferroviários desempenha um papel fundamental. Além de otimizar os recursos destinados ao planejamento e manutenção das vias, essa abordagem ajuda a prevenir interrupções e restrições nas operações ferroviárias (JUNQUEIRA; MOTTA; OLIVEIRA, 2023).

Para se alcançar este objetivo, é necessário realizar avaliações periódicas das condições das vias férreas em intervalos pré-definidos. Essas avaliações podem ser conduzidas por um ou mais tipos de veículos de inspeção. Conforme ocorre o envelhecimento da ferrovia, a frequência e o número de pontos de verificação podem precisar ser reavaliados (TZANAKAKIS, 2013).

De acordo com Li *et al.* (2016), a eficiência no setor ferroviário será alcançada quando as equipes ferroviárias puderem facilmente interpretar e tomar medidas diante da vasta quantidade de dados disponíveis. Isso inclui dados da operação e informações sobre a estrutura do pavimento ferroviário, como dados geotécnicos e de suporte da via, bem como informações relacionadas à geometria e irregularidades da via. A integração de todas as informações auxiliará na investigação de possíveis problemas, muitas vezes complexos e difíceis de abordar a partir de uma única perspectiva. Uma abordagem baseada em dados vai além do uso de ferramentas de análise específicas para prever irregularidades, pois trata-se de um processo abrangente que inclui planejamento, coleta de dados, análise, avaliação de alternativas, formulação de políticas e análise de custo-benefício (LASISI, 2016).

Portanto, quanto mais se consegue adquirir, manipular e ter um alinhamento entre dados de diferentes equipamentos e levantamentos da via, mais informações se têm para se priorizarem e se planejarem intervenções preventivas, e melhor serão os resultados.

A centenária Estrada de Ferro Vitória-Minas (EFVM), sob concessão da VALE, liga as cidades de Belo Horizonte (MG) e Vitória (ES) ao longo de aproximadamente 2.000 quilômetros de linhas. Trata-se de uma ferrovia importante no Brasil, tendo sido responsável por cerca de 12% do volume transportado (em toneladas por quilômetro útil) pelas ferrovias brasileiras em 2021, o que a coloca atrás apenas das EFC e da MRS (CNT, 2021b; VALE, 2015).

A gestão da EFVM tradicionalmente utiliza o CC para monitorar sua ferrovia, mas recentemente configurou um VI para realizar levantamentos contínuos ao longo de sua trajetória, obtendo, assim, maiores informações sobre a via, os quais poderiam complementar as análises com o CC. Enquanto o uso do CC na coleta de dados é amplamente reconhecido no meio técnico e mencionado em diversos trabalhos como de Barbosa (2017) e Costa et al. (2016), o VI ainda é uma ferramenta de inspeção pouco conhecida no Brasil.

Deste modo, este trabalho busca entender a resposta desses dois sistemas (CC e VI) à geometria da via. Os parâmetros do VI, incluindo sua combinação com os dados coletados pelo CC, foram o foco deste estudo, com o propósito de interpretar e verificar a utilidade das medições do movimento oscilatório do vagão em avaliações da via. A utilização dessas tecnologias combinadas permitirá a coleta de dados de parâmetros de inspeção geométrica em maiores quantidades, com maior confiabilidade e precisão, obtidos de forma única e digital. Isso auxiliará no processo de tomada de decisão e na eficiência na gestão de manutenção de vias, de acordo com o novo modelo da Indústria 4.0.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é avaliar a condição geométrica da ferrovia a partir das informações coletadas com CC e VI, de forma a observar eventuais correlações dos atributos mensurados por ambos os equipamentos. Para tanto, foram feitas análises estatísticas e visualização dos dados tomando como estudo de caso a Estrada de Ferro Vitória a Minas, cujos dados foram

levantados ao longo do ano de 2020. Para atingir este objetivo principal, alguns objetivos secundários foram estabelecidos, a saber:

- Elaborar resumo estatístico e desenvolver estratégias para o consumo das informações;
- Avaliar as condições de geometria a partir da dinâmica de um vagão comercial;
- Investigar possíveis correlações entre distúrbios geométricos e as medidas do VI;
- Validar o VI como um equipamento de inspeção para um controle efetivo dos ativos ferroviários, além de aprofundar o conhecimento sobre avaliações da qualidade da via férrea instrumentos embarcados em veículos;
- Comprovar a importância e relevância da aplicação do conhecimento da ciência dos dados para o setor ferroviário.

1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação se encontra dividida em 5 capítulos e apêndices ao final do documento, conforme descritas abaixo:

- Capítulo 1 – INTRODUÇÃO
- Capítulo 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA
- Capítulo 3 – ESTUDO DE CASO
- Capítulo 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES
- Capítulo 5 – CONCLUSÃO E COMENTÁRIOS
- APÊNDICES

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo constitui uma revisão bibliográfica onde são apresentados conceitos essenciais para compreensão do contexto teórico no qual se insere a pesquisa. Inicialmente, são abordados os fundamentos relacionados à geometria de via férrea, delineando os principais problemas nesse domínio. Posteriormente, são apresentados os modos de oscilação dinâmica do vagão, seguidos pelos respectivos equipamentos que registram a dinâmica veicular e os que medem a geometria da via, explorando os principais sensores utilizados por eles. Também se introduziu os conceitos de ciência dos dados, fundamentais ao trabalhar com uma grande quantidade de registros provenientes de diferentes fontes e frequências de aquisição.

Em seguida, são abordadas as principais metodologias para se avaliar a qualidade da via, delineando lacunas existentes na literatura atual, identificando as principais tendências, avanços e desafios enfrentados pelos pesquisadores. Ao final, define-se as ações de manutenção para os ativos ferroviários. Este capítulo tem como objetivo fornecer um panorama abrangente, abordando teorias, conceitos e avanços que moldam o contexto do trabalho, proporcionando uma base para a compreensão das contribuições apresentadas na dissertação.

2.1 GEOMETRIA DA VIA FÉRREA

A geometria da via férrea descreve a posição que cada trilho, ou a linha central, ocupa no espaço tridimensional sem carregamento, em termos das suas propriedades longitudinais (alinhamento), transversais (bitola) e vertical (perfil transversal) (AREMA, 2020; LASISI, 2016).

A qualidade da geometria da superestrutura e da infraestrutura ferroviária desempenham um papel fundamental na determinação da velocidade e das condições de segurança dos veículos que circulam na ferrovia (LEITE, 2017; SADEGHI; ASKARINEJAD, 2007; SELIG; WATERS, 1994). Conforme Selig e Waters (1994), mesmo em diferentes velocidades dos trens, as ondulações na via podem gerar vibrações verticais que, dependendo de sua frequência, podem prejudicar o conforto dos passageiros e acelerar o desgaste. Embora as vias sejam projetadas para atender a padrões de construção e operação rigorosos, estas estão sujeitas a desgastes, como mencionado anteriormente, principalmente devido ao tráfego, que podem resultar em desvios nas especificações de projeto, ou seja, anomalias na geometria. Com intuito de se manter esta, é necessário que sejam realizadas inspeções e manutenções em toda linha

férrea (FORTUNATO, 2005; LEITE, 2017). Dentro deste contexto, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da NBR 16387 (2016), destaca como possíveis irregularidades geométricas aquelas descritas nos subitens a seguir (2.1.1 a 2.1.5).

2.1.1 Alargamento ou estreitamento de bitola

A bitola é a distância entre as faces internas das duas linhas dos trilhos, medida a 16 mm do topo do boleto. Trata-se de uma importante característica geométrica da via, sendo um indicador de sua qualidade, tanto de construção, quanto de conservação. Ou seja, quando há um aumento ou estreitamento da bitola da ferrovia pode-se eventualmente observar, por intermédio deste parâmetro, o reflexo do desgaste dos materiais ou a presença de problemas na via (LEITE, 2017).

Essas alterações da medida, como por exemplo $y < x$ na Figura 1, podem ocorrer por problemas em grupos de dormentes em condições ruins ou desgastados, ou ainda por falta de fixação nas juntas (ABNT NBR 16387, 2016).

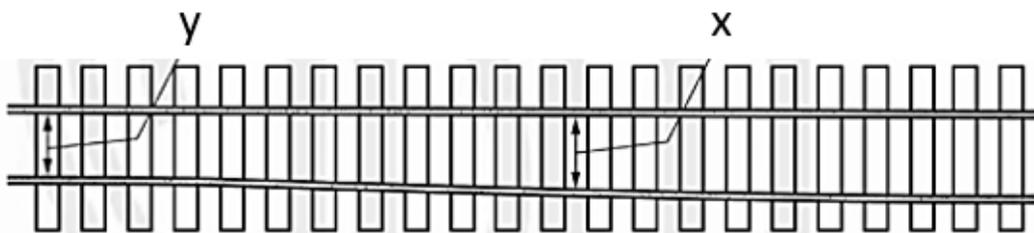


Figura 1 – Variação da bitola (x-y)

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 16387 (2016).

2.1.2 Desnívelamento longitudinal e desalinhamento transversal

O nivelamento pode ser medido no sentido longitudinal, o qual diz respeito à disposição das cotas do topo do trilho para ambas as linhas ao longo do traçado da via, além de poder ser medido na transversal, que por sua vez está relacionado às disposições das cotas dos boletos dos trilhos paralelos. Em ambos os casos, havendo alguma deformidade em sua geometria, esta é nomeada desnívelamento (ROSA; RIBEIRO, 2016).

O desnívelamento longitudinal é a medida da flecha vertical, a partir do topo do trilho, no meio de uma corda de 20 m, conforme descrição da ABNT NBR 16387 (2016). De forma prática, no

desnívelamento longitudinal se considera que a fila de trilho se desloca verticalmente para baixo, conforme ilustrado na Figura 2. As variações devido às irregularidades verticais na via podem favorecer a oscilação vertical na suspensão dos veículos ferroviários, movimentação esta chamada de *bounce* (SOLEIMANMEIGOUNI, 2019).

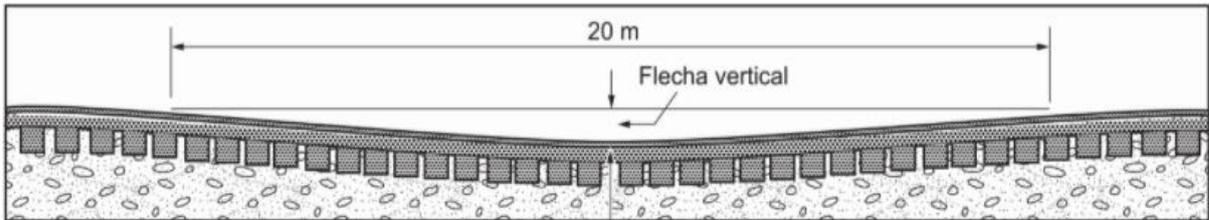


Figura 2 – Desnívelamento longitudinal

Fonte: ABNT NBR 16387 (2016).

Já o desnívelamento transversal, representado pela Figura 3, é a diferença entre a altura real medida na seção transversal e a teórica (de projeto), conforme descrito pela Equação (1) (PROFILLIDIS, 2014). Nos trechos de via em tangente (quanto ao alinhamento horizontal) em que a curvatura é zero, o desnívelamento transversal é a diferença entre as elevações dos trilhos interno e externo. Uma ferrovia é considerada nivelada quando não apresenta depressões ou elevações na via que possam causar alívio das rodas dos veículos ferroviários (BILHERI *et al.*, 2001). Essas depressões podem decorrer, por exemplo, em virtude de vazios entre a superfície inferior do dormente e a camada de lastro, que podem ser resultado da movimentação dos materiais subjacentes à grade.

$$DT = (Z_i - Z_e)_{teórico} - (Z_i - Z_e)_{real} \quad (1)$$

Onde DT é o desnívelamento transversal, Z_i é a elevação do trilho interno e Z_e é a elevação do trilho externo

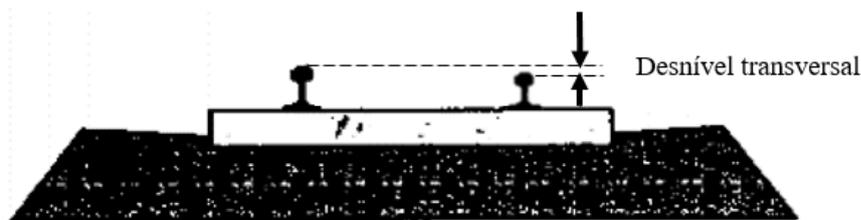


Figura 3 – Desnívelamento transversal

Fonte: Adaptado de Profillidis (2006).

Se for constatada essa diferença entre as irregularidades do trilhos esquerdo e direito isto pode provocar um movimento de rolagem (*roll*) maior aos veículos que trafegam em segmentos com essas anomalias (TUDEIA *et al.*, 2019). Geralmente, esse tipo de anomalia ocorre devido aos vazios que se formam entre a superfície inferior do dormente e a camada de lastro (RODRIGUES, 2001).

Além disso, problemas como o movimento lateral e/ou o assentamento, que podem ser causados por questões como liquefação do solo ou falha na compactação do aterro, têm o potencial de provocar deformações no solo subjacente, afetando significativamente a geometria da via.

Não se pode deixar de se mencionar que o excesso e o mau acondicionamento da carga transportada nos veículos ferroviários podem causar sobrecargas verticais no boleto do trilho, acelerando o processo de degradação em relação ao nivelamento (TUDEIA *et al.*, 2019).

Em outras palavras, tanto os aspectos relacionados ao material rodante quanto às camadas que compõem o pavimento ferroviário são importantes para garantir o nivelamento adequado da via.

2.1.3 Empenamento (ou torção)

Empenamento (torção, ou *twist* em inglês) é uma irregularidade de geometria de via formada pela diferença de nivelamento transversal entre seções transversais na via (*i* e *i+1*) (Figura 4). Para o seu cálculo consideram-se quatro pontos sobre a superfície de rolamento dos trilhos, dois sobre cada trilho, definindo-se como empeno ou torção o desvio de um ponto dos pontos em relação ao plano definido pelos demais conforme apresentado na Equação (2) (PEDRONI, 2008; PROFILLIDIS, 2014).

$$Empeno = \frac{DT_{i+1} - DT_i}{\Delta l} \quad (2)$$

Onde Δl é o espaçamento longitudinal entre as duas seções transversais sucessivas (*i* e *i+1*); DT é o desnível transversal;

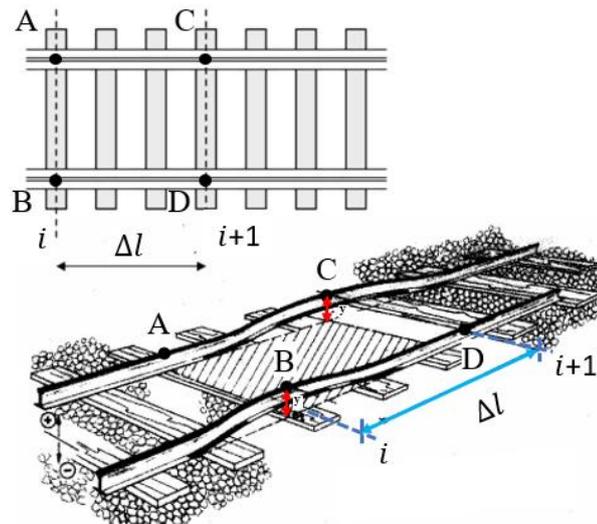


Figura 4 – Representação do desvio (y) para duas seções transversais (i e $i+1$) em um plano definido na via, onde A, B, C e D são pontos na superfície de rolamento dos trilhos utilizados para determinar o empeno

Fonte: Adaptado de Profillidis (2014) e Rodrigues (2001).

De acordo com Silva (2006), a distorção longitudinal pode causar empenamento, torção ou altas tensões de tração nos trilhos (culminando com sua ruptura). A ocorrência de empeno se deve aos mesmos motivos que a dos desnivelamentos, podendo provocar o descarrilamento dos trens. Cabe mencionar que este tipo de defeito é mais frequente em linhas férreas que possuem abundância de juntas consecutivas (SILVA, 2006).

2.1.4 Desalinhamento

O desalinhamento pode ser descrito como o desvio horizontal da posição atual da via em relação à sua posição teórica (PROFILLIDIS, 2014). Esse defeito pode surgir devido à presença de dormentes quebrados, à ocorrência de ombros de lastro insuficientes para atender às solicitações, ou por desgastes das placas de apoio (PEDRONI, 2008).

O desalinhamento é considerado como tal quando o valor (x), conforme Figura 5, ultrapassa os limites de tolerância estabelecidos pelas normativas técnicas. É definido pela medição da distância horizontal da flecha entre dois pontos consecutivos no mesmo trilho em uma distância em linha reta entre eles conhecida, a qual é definida pela ABNT NBR 16387 (2016) em 10 m (PEDRONI, 2008; ROSA; RIBEIRO, 2016).

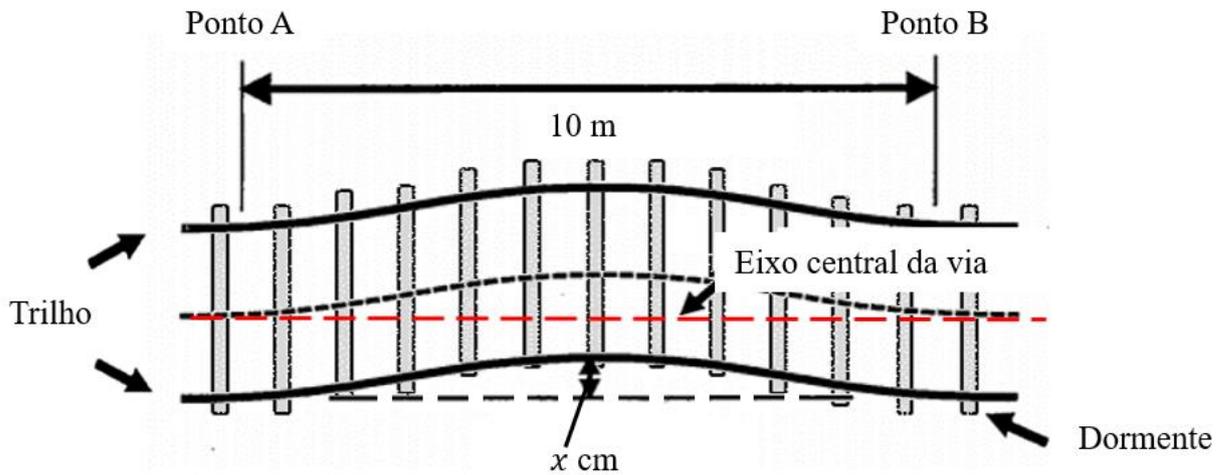


Figura 5 - Desenho esquemático representando o desalinhamento conforme critério da (ABNT NBR 16387, 2016)

2.1.5 Deficiência de Superelevação

A superelevação, conforme ilustrado na Figura 6, trata-se da medida da diferença de elevação entre os trilhos interno e externo sob o mesmo ponto de referência, medida esta que é feita na parte superior do trilho. O cálculo da superelevação é feito pela Equação (3), que relaciona a velocidade do trem, a bitola e a curvatura da via, sendo esta nomeada como superelevação teórica (AREMA, 2020; MANTARAS; RODRIGUEZ, 2003).

$$e = \frac{B \cdot v^2}{g \cdot R} \quad (3)$$

Onde e é a superelevação em metros (m), B é a bitola em metros (m), v é a velocidade do trem em metros por segundo (m/s), g é a aceleração devido à gravidade (aproximadamente 9,81 m/s²) e R é o raio da curva em metros (m).

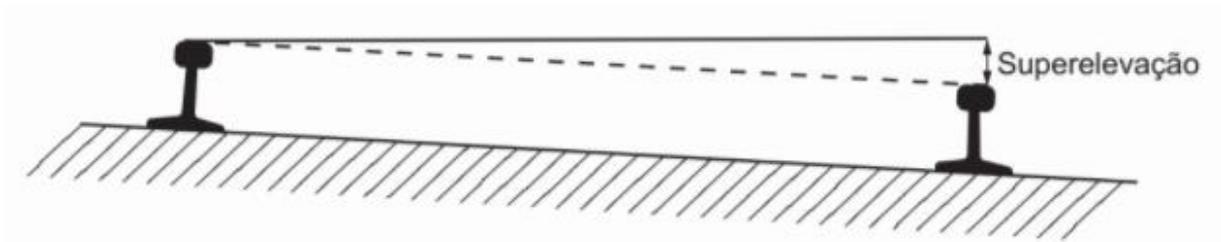


Figura 6 – Representação da superelevação.

Fonte: ABNT (2016)

A superelevação, quando em excesso ou insuficiente, pode interferir diretamente na operação da via. A superelevação, quando calculada com base no equilíbrio de forças, presume uma velocidade constante ao longo da curva. No entanto, essa condição se aplica apenas em situações específicas, como em vias metropolitanas, por exemplo. As ferrovias, no entanto, podem operar com diferentes classes de tráfego, incluindo o transporte de passageiros e de carga. Essas situações demandam cálculos para diferentes faixas de velocidade para diferentes materiais rodantes. Quando a superelevação é otimizada para altas velocidades de tráfego, trens mais lentos, que geralmente também são mais pesados, a superelevação aumenta a tensão no trilho interno, levando a desgaste excessivo. Se otimizada para velocidades mais baixas, pode haver redução no conforto e na segurança dos trens que operam em altas velocidades. Em outras palavras podem surgir casos de insuficiência ou excesso de superelevação (AREMA, 2020; MANTARAS; RODRIGUEZ, 2003; PROFILLIDIS, 2014; STECH, 2012).

O excesso de superelevação ocorre em situações em que os trens trafegam em baixa velocidade. Caso a superelevação não for estabelecida corretamente, pode ocorrer o tombamento do trem para dentro da curva. Já a insuficiência de superelevação ocorre quando há uma aceleração transversal não compensada no sentido externo da curva, com um valor superior ao equilíbrio das forças, o que pode levar ao descarrilamento (AREMA, 2020; MANTARAS; RODRIGUEZ, 2003; PROFILLIDIS, 2014; STECH, 2012).

2.2 DINÂMICA DE OSCILAÇÃO DO VAGÃO NA VIA

O estudo da dinâmica de veículos ferroviários é de importância fundamental na prevenção de acidentes e no estabelecimento de critérios para evitá-los. O tráfego estável dos veículos da via está diretamente relacionado com o desempenho de seu movimento.

A dinâmica do material rodante é determinada pela interação entre roda e o trilho. O movimento instável pode ocasionar consideráveis forças laterais, provocando danos à superfície devido a escorregamentos e exercendo pressão elevada de contato. Essa condição, por sua vez, reduz a vida útil de alguns componentes da superestrutura e infraestrutura, caso não seja reparada. Desvios na geometria, tanto vertical quanto horizontalmente ao longo da via, podem resultar em acelerações indesejadas do material rodante. É crucial que defeitos localizados sejam reparados em tempo hábil, caso contrário, as forças dinâmicas geradas pelo movimento das composições podem criar irregularidades adicionais (ESVELD, 2001; NABOCHENKO *et al.*, 2023).

O tráfego de veículos ferroviários na via exibe uma variedade de oscilações, especialmente em situações em que há diferenças de rigidez, juntas e aparelhos de mudança de via. Nessas situações, a carga dinâmica na via é maior, resultando em movimentação diferenciada das composições. Em casos extremos, essas oscilações podem até levar ao descarrilamento, à medida que a relação entre a carga horizontal que atua no trilho e a carga vertical (conhecida como L/V) aumenta (ESVELD, 2001; SILVA, 2019).

Portanto, a análise do comportamento do veículo durante sua passagem na via férrea pode fornecer parâmetros para apoiar a avaliação da severidade e dar subsídios para intervenções de manutenção eficazes. A dinâmica de movimentos do vagão, derivada de seus graus de liberdade, é apresentada na Figura 7.

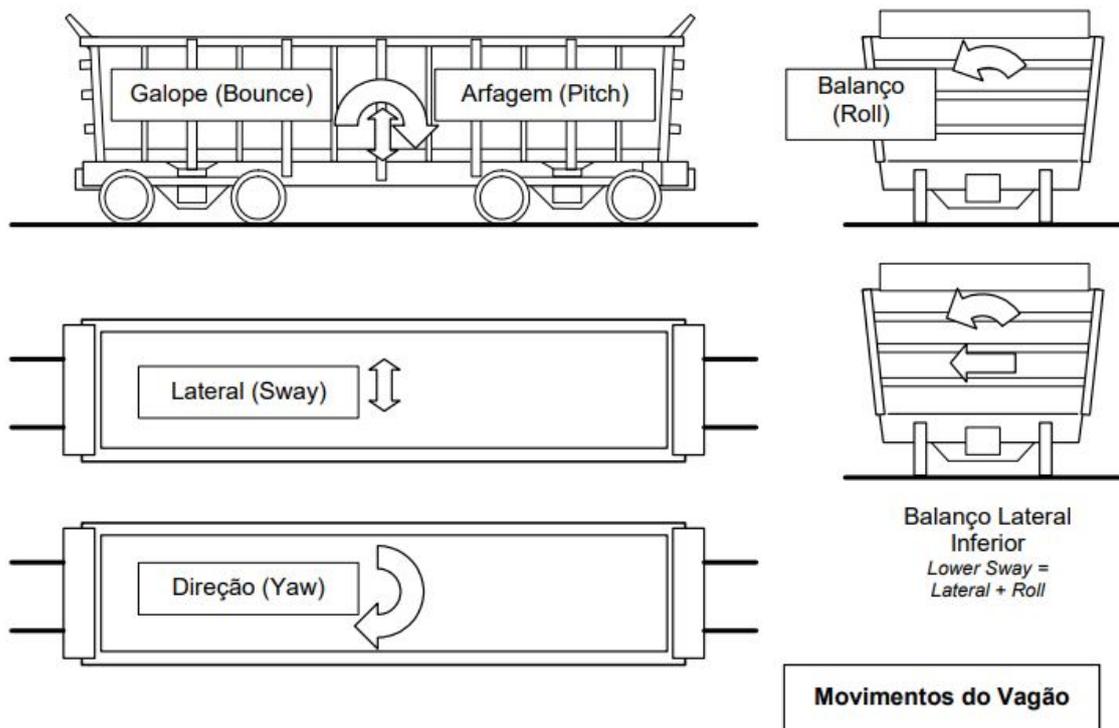


Figura 7 – Movimentos do vagão

Fonte: Barbosa¹ (2007, apud SANTOS, 2015).

Os movimentos do vagão no sentido longitudinal (Figura 8) são provocados por forças de tração e compressão, que estão associadas à diferença de aceleração entre os vagões no sentido de movimento das composições ferroviárias (SILVA, 2019).

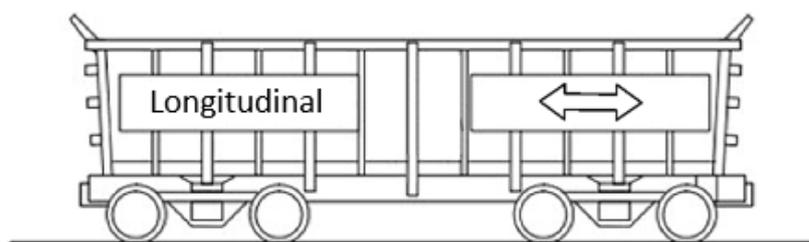


Figura 8 – Movimento longitudinal do vagão

Fonte: Adaptado Barbosa (2007, apud SANTOS, 2015).

¹ Barbosa, R. S., Investigação experimental do comportamento dinâmico de vagão de minério tipo GDE em tráfego na via com travessão (EFVM – CVRD). Relatório técnico 010/2007, FUSP, 2007.

Já para o caso de movimentações verticais do vagão, a variação para um nível superior representa um desvio positivo da altura da via. Por outro lado, a variação para um nível inferior ilustra o efeito oposto. Pode ocorrer variação de nível de forma cruzada, ou seja, em relação às duas fileiras de trilhos, quando um trilho possui um nível superior em relação ao trilho oposto.

O efeito proveniente da variação de níveis, ou seja, irregularidades verticais da via férrea, proporciona modos de oscilações de arfagem e galope, ilustrados na Figura 7 (GRANDO, 2012; SILVA, 2019).

Em uma situação de irregularidade da via em nível cruzado, a resposta do veículo à variação é uma movimentação de rolagem (*roll*) em direção ao lado de nível inferior (Figura 9), Em consequência à esta oscilação, há a rolagem lateral (*lower sway*), que consiste na translação lateral da caixa combinada com a rolagem (SILVA, 2019).



Figura 9 – Representação do movimento oscilatório de rolagem combinado com rolagem lateral

Fonte: Grandó (2012).

É perceptível a importância de se analisarem os modos de oscilação de rolagem para vagões no trilho, já que, ao oscilar, pode haver um deslocamento no peso da carga e desestabilização do mesmo. O movimento de rolagem harmônica do vagão (*BodyRock*), também conhecida como balanço, pode gerar desgaste de componentes do truque. É considerado o principal motivo de descarrilamento devido ao levantamento da roda (VIGANICO, 2010; SILVA, 2019).

Conforme Viganico (2010), e ilustrado na Figura 10, quando há uma diferença de alturas entre os trilhos, o veículo balança em direção ao lado mais baixo com ângulo de rotação em torno do eixo x.

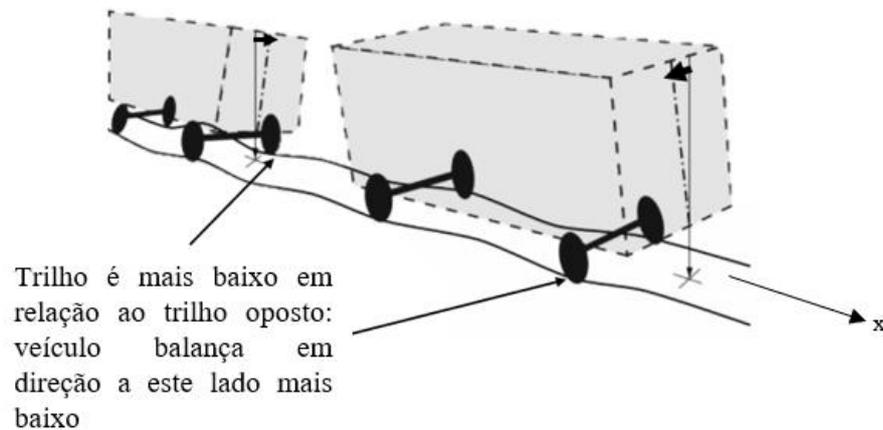


Figura 10 – Rolagem harmônica dos vagões

Fonte: Adaptado de ABNT (2016).

Estes modos de oscilação do veículo podem estar diretamente relacionados ao conjunto de amortecimento. A suspensão suporta o corpo do veículo, fornece orientação direcional, filtra os efeitos das imperfeições da via e fornece estabilidade dinâmica. Portanto, a verificação do sistema de suspensão não é apenas uma etapa importante para avaliar o estado dos amortecedores, mas também permite avaliar as alterações da via que afetam o movimento de rolagem do vagão (SILVA, 2019).

Para se avaliar a suspensão utiliza-se um sistema de mola acoplado a uma célula de carga que, por meio da relação matemática definida pela lei de Hooke, possibilita a determinação do seu deslocamento.

De acordo com Mazilu (2009) e Silva (2019), quando o veículo se encontra em trechos de curva, forças laterais entre a roda e o trilho são produzidas devido a irregularidades na curva, resultantes de variações abruptas em suas características, onde outros modos de oscilação são observados, cuja sua intensidade está associada pela dimensão dessas irregularidades. O movimento de oscilação lateral (*sway*) e a guinada (*yaw*) estão representados na Figura 11.

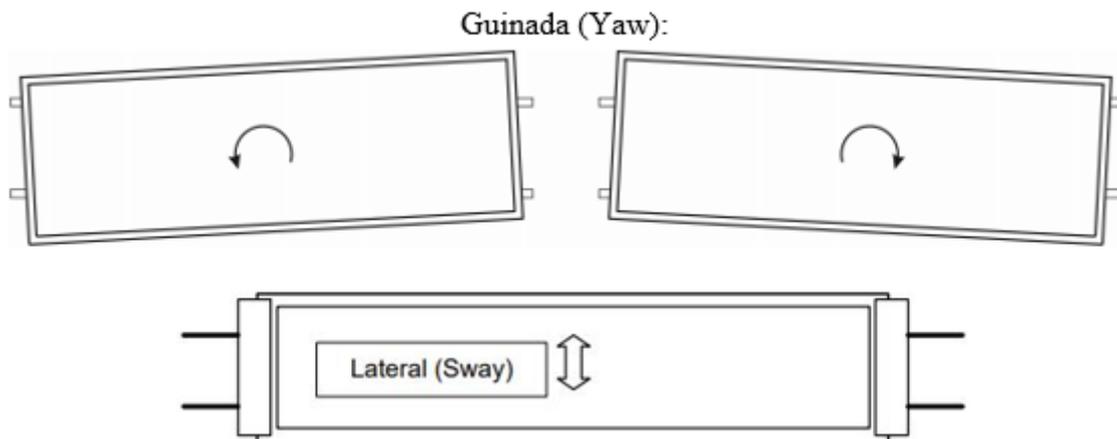


Figura 11 – Representação do modo de oscilação: guinada e lateral

Fonte: Adaptado de Grando (2012) e Barbosa (2007, apud Santos (2015)).

Outro movimento que ocorre nos veículos ferroviários é derivado da guinada. Trata-se do movimento de lacet, que é a combinação de uma oscilação acentuada de rolagem e guinada resultando em um movimento lateral dos rodeiros conforme a Figura 12.

Tal movimento é transmitido para o corpo e truques por meio da suspensão, que depende diretamente da velocidade de circulação do vagão, sendo estável em baixas velocidades e instável em altas velocidades. Acima da velocidade crítica, as forças atuantes no contato roda-trilho são elevadas, o que pode resultar em grande risco de descarrilamento, vibração e danos tanto ao material rodante quanto à via férrea (MAZILU, 2009).

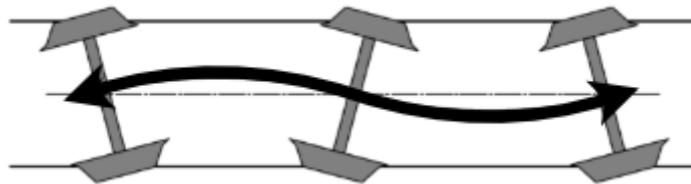


Figura 12 – Movimento de lacet (*hunting*)

Fonte: Silva (2019).

2.3 EQUIPAMENTOS DE INSPEÇÃO DA VIA FÉRREA

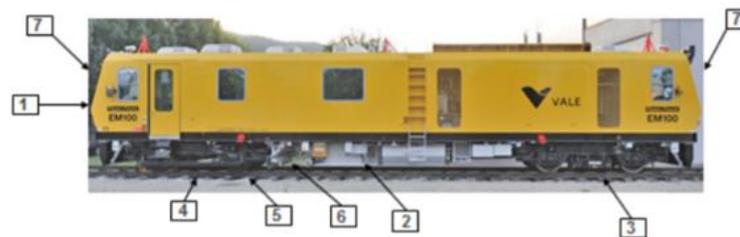
As inspeções são aplicadas pelas empresas ferroviárias como base para detectar irregularidades que aparecem durante o uso da via e desempenham um papel fundamental na manutenção e operação segura das ferrovias (SILVA, 2012).

Os mais diversos fatores como a circulação de trens, tráfego, características do subleito, variações climáticas, qualidade da execução e políticas de manutenção contribuem para alterações constantes no estado e no desempenho das estradas de ferro. Por esta razão, as medidas de manutenção só podem ser planejadas com eficácia se as condições reais da via são determinadas.

Deste modo, foram desenvolvidos equipamentos, como vagão instrumentado e carro controle, para realizar a medição automatizada da dinâmica veicular e dos parâmetros geométricos da linha, incluindo dados relativos ao desgaste da via de forma indireta e direta, respectivamente.

2.3.1 Carro controle

Um método comum de avaliar a condição da geometria da via é fazendo uso da inspeção automatizada pelo carro controle (veículo de avaliação de via, em inglês *Track Evaluation Vehicle* - TEV) (LI *et al.*, 2008; SILVA, 2002). O carro controle funciona como uma “prova de carga”, que define uma posição espacial da resposta da via (resposta predominantemente elástica) a um carregamento (peso próprio) que o veículo imprime sobre a linha. O CC é um veículo equipado com câmeras, sensores e computadores, capaz de prover dados que possibilitam o levantamento das condições de geometria da via férrea, por exemplo (Figura 13).



1. TunelLaser - Leitor de Gabarito da via
2. Acelerômetros - Leitor de aceleração vertical e horizontal
3. KLD - Leitor de perfil do trilho e bitola
4. OGMS - Leitor de bitola em 2 pontos
5. IMU - Unidade de medição inercial – leitor de geometria
6. RailCheck - Imagens dos trilhos, dormentes e fixações
7. RailScan – Imagens panorâmicas da via

Figura 13 – Exemplo de equipamento de inspeção carro controle (modelo Plasser) e seus respectivos sistemas, parâmetros e aplicações

Fonte: Adaptado de Costa et al. (2016).

Os sensores do CC não ficam em contato físico direto com os trilhos durante o processo de medição: os parâmetros geométricos são calculados com base nos dados relativos às sucessivas posições dos sensores em relação aos trilhos. Este sistema é muito versátil para a coleta de dados por comprimentos de onda, uma vez que permite escolher e, portanto, filtrar os comprimentos de onda desejados, de acordo com as necessidades das equipes de engenharia de manutenção (MOURA, 2010).

Esse equipamento de auditoria permite registrar parâmetros geométricos como bitola, nivelamento, empeno, alinhamento e superelevação, além de observar o trilho e suas fixações (conforme mostrado na Figura 14), sob forma numérica e gráfica. Ele fornece informações em tempo real, permitindo verificar se os valores lidos estão dentro dos limites aceitáveis previstos em normativas ou pela administradora da via (por exemplo, tolerância de aceitação para linhas novas ou renovadas e níveis de segurança) (SILVA, 2012).

Com um conjunto de sensores, o CC pode realizar medições da via de acordo com a quantidade e formato desejados para a obtenção dos dados, tornando-o altamente versátil (MOURA, 2010). Isso significa que esse equipamento tem a capacidade de gerar uma grande quantidade de informações que podem ser interpretadas e avaliadas para futuras intervenções de manutenção na ferrovia. Conforme Silva (2002), existem diversas versões deste equipamento disponíveis de diversos fabricantes, com capacidade de atingir velocidades superiores a 100 km/h.

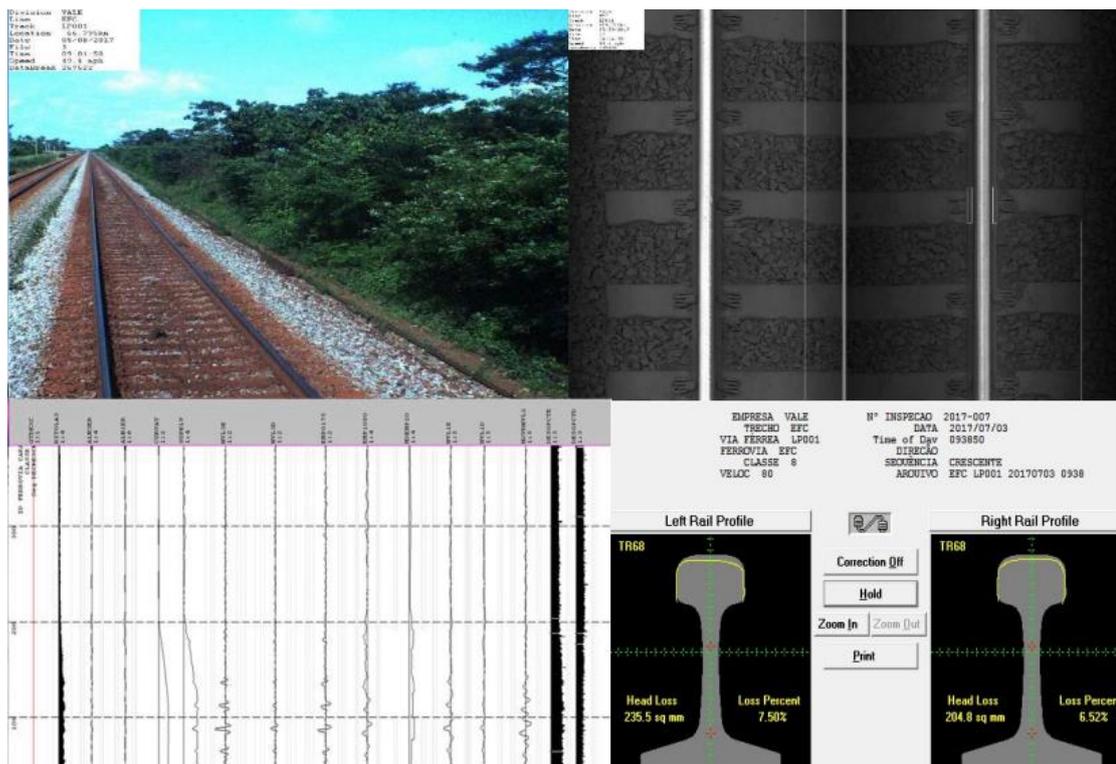


Figura 14 – Exemplo de laudo de inspeção com carro controle

Fonte: VALE S.A.

2.3.2 Vagão instrumentado

Em comparação com o CC, o VI é um equipamento que permite medir a condição da via e do material rodante nas condições reais operacionais de uso, ou seja, as medidas são levantadas em um vagão de uma composição que irá circular, estando cheio ou vazio (portanto, a carga difere), sob condições de velocidade de operação.

Em um VI é possível instalar diversos sensores (exemplo na Tabela 1), que permitem medir a movimentação do veículo enquanto este se desloca na ferrovia. Alguns sensores têm a finalidade de avaliar o estado do veículo, enquanto outros, por exemplo, podem identificar a

forma de condução das composições pelos maquinistas, fazendo uso de sensores na haste. Além disso, também é possível identificar a resposta que a via gera no vagão, por meio de sensores que registram as movimentações verticais, horizontais e laterais do veículo.

Tabela 1 – Exemplo quantitativo de sistema de sensores em VI e sua respectiva localização em um vagão tipo GDE.

Sensor	Local	Quantidade
Acelerômetro Uniaxial	Truque	4
GPS	Vagão	1
Sensor de Pressão	Linha de ar	1
Células de carga	Truque	4
Haste Instrumentada	Haste engate	2
Acelerômetro Triaxial	Corpo do vagão	1

Fonte: Adaptado de Tudeia et al. (2019)

De acordo com Santos (2017), os principais sensores que podem ser instalados no VI (Figura 15) são:

- Células de carga – medem o deslocamento vertical da suspensão secundária por meio da lei de Hooke. Sua finalidade é monitorar a interação entre vagão e via, por meio da dinâmica da força aplicada pela mola acoplada na extremidade de uma célula de carga;
- Acelerômetros uniaxiais – instalados na lateral dos truques, realizam a leitura das acelerações verticais causadas por forças que agem no contato roda com o trilho, com a função de identificar pequenos impactos ocasionados por irregularidades na via;
- Acelerômetro triaxial – fornece a aceleração **x**, **y** e **z** do corpo do vagão. Tem a responsabilidade de coletar dados das acelerações laterais do vagão, informando a aceleração centrípeta no momento da curva do vagão e também o movimento de lacet (*hunting*);
- GPS – utilizado para monitoramento da localização do vagão durante a aquisição dos dados na via;

- Haste instrumentada – haste rígida com sensores para realizar a leitura de forças internas que agem no vagão. Estas informações podem detalhar sobre as práticas, estratégias de condução e configuração das locomotivas;
- Sensor de pressão – tem a finalidade de coletar dados sobre as variações de pressão no encanamento geral e, conseqüentemente, informar a dinâmica longitudinal dos vagões.

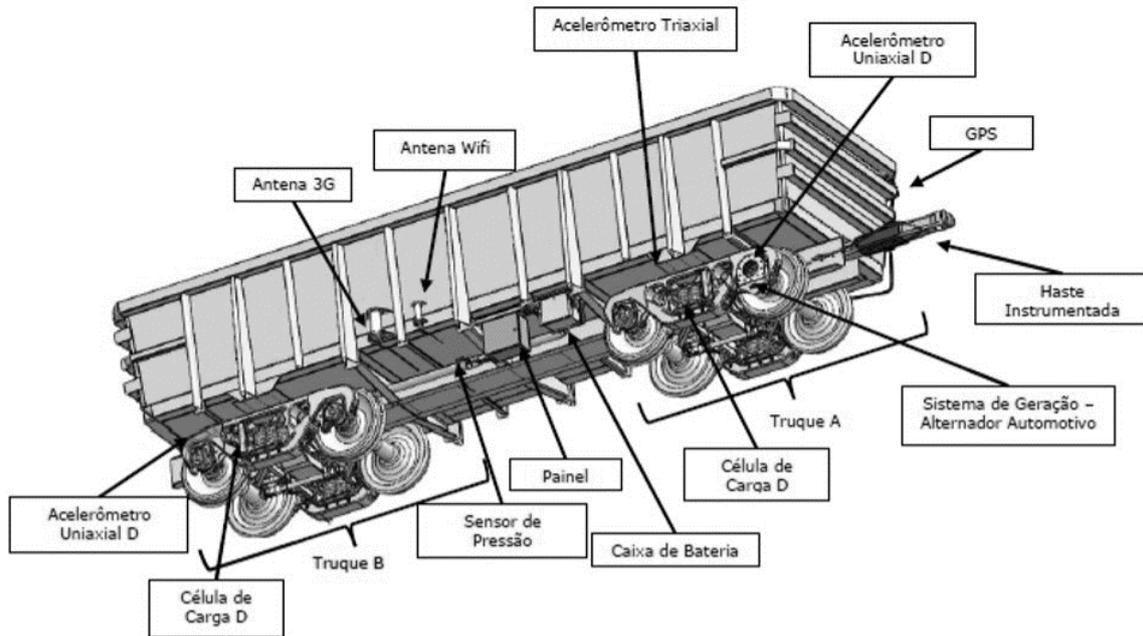


Figura 15 – Equipamento de inspeção Vagão instrumentado

Fonte: Tudeia et al. (2019).

No VI são colocados acelerômetros (essencialmente geofones) na caixa de rolamento da roda dos vagões para medir a aceleração vertical (Figura 16). Conforme a massa oscila, a carga varia e, conseqüentemente, a carga transmitida à via e a seu deslocamento vertical são efetivamente medidas (LI *et al.*, 2016).

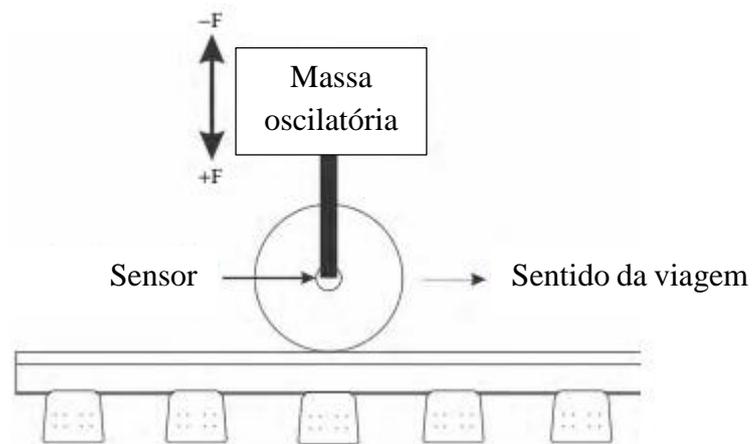


Figura 16 – Exemplo representativo do posicionamento de um acelerômetro e processo de leitura dos sensores

Fonte: Adaptado de Li et al. (2016).

A medição desses valores no peso não suspenso do vagão (conforme ilustrado na Figura 17), permite uma avaliação mais precisa do perfil vertical do trilho. Essas medições podem ser usadas para ajudar a detectar danos e o grau de degradação da via, uma vez que o peso não suspenso do vagão é mais sensível às irregularidades desta última. Por outro lado, o peso suspenso, que se refere aos elementos apoiados sobre a suspensão do veículo, possui sua oscilação condicionada pela suspensão do veículo (SILVA, 2002). É importante destacar a dependência do estado de conservação do material rodante, especialmente do sistema de suspensão, para sistemas de inspeção embarcados como o VI.

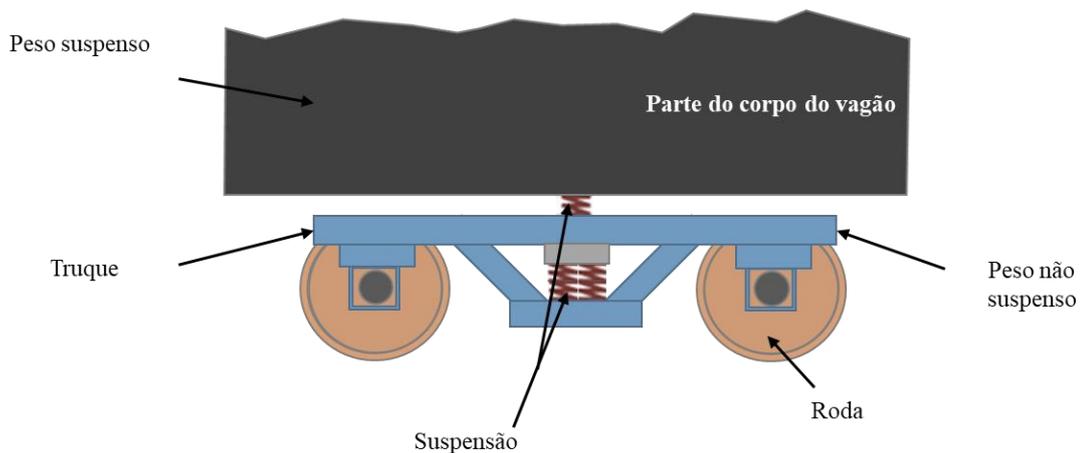


Figura 17 – Representação do peso suspenso e não suspenso do vagão

De acordo com Viganico (2010) e Yeo (2017), sob a ação de forças aplicadas, o veículo pode se movimentar em qualquer dos seis eixos de liberdade aplicados ao vagão. Esses eixos são

classificados em translacionais: vertical ou galope (*bounce*) z , lateral (*sway*) x e longitudinal y ; e três rotacionais: ângulo de guinada (*yaw*) Ψ , arfagem (*pitch*) Φ e rolagem (*roll*) θ , ilustrados pela Figura 18.

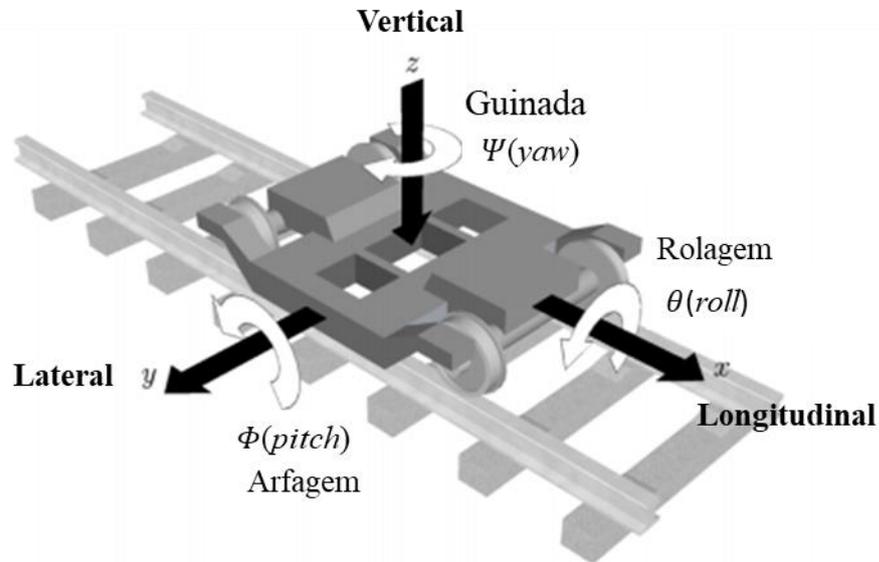


Figura 18 – Eixos de movimentação livre dos vagões

Fonte: Adaptado de Yeo (2017).

O sistema dos sensores deve estar posicionado estrategicamente para conseguir medir as oscilações nos eixos de liberdade do vagão e, para alimentá-lo, é necessário se fazer o uso de um sistema de geração de energia por alternador ligado à roda do truque do vagão.

Dentre os parâmetros que quantificam a movimentação do veículo na via férrea, destacam-se os seguintes atributos coletados pelo VI para análise dos dados:

- a. **Roll** ou **BodyRock** (rolagem harmônica do veículo) – Também conhecido como balanço (seu ângulo de rotação é em torno do eixo x), cujo algoritmo para cálculo é descrito pela Figura 19.

Algoritmo : Cálculo do Roll

```

1 Dados iniciais: Deslocamento vertical da suspensão secundária -
2  $DA_{esq}, DA_{dir}, DB_{esq}$  e  $DB_{dir}$ 
3 Resultado:  $Roll$ 
4 Inicialização do algoritmo
5
6 ▷ As duas linhas abaixo representam a amplitude máxima vertical dos rodeiros
7
8  $R_{frontal} = DA_{esq} - DA_{dir}$ 
9  $R_{traseiro} = DB_{esq} - DB_{dir}$ 
10
11 if  $\max(R_{frontal}, R_{traseiro}) \geq \min(R_{frontal}, R_{traseiro}) * -1$  then
12 |  $Roll = \max(R_{frontal}, R_{traseiro})$ 
13 else
14 |  $Roll = \min(R_{frontal}, R_{traseiro})$ 
15 end
16

```

Figura 19 – Algoritmo para cálculo do parâmetro *BodyRock*

Fonte: Tudeia et al. (2019).

- b. ***Suspension Travel*** (“folga da suspensão”) – Utilizado para medir o deslocamento da suspensão do vagão, este sistema consiste em uma mola presa a uma extremidade de uma célula de carga de tensão. A força aplicada altera levemente a forma da célula de carga, que está sob tensão, convertendo a força em um sinal elétrico (TUDEIA *et al.*, 2019). A suspensão desempenha um papel fundamental, sustentando o veículo, orientando sua direção, filtrando as imperfeições da geometria da via e garantindo estabilidade dinâmica. O movimento da suspensão pode afetar o movimento de rolagem do veículo e é calculado conforme demonstrado na Figura 20.

Algoritmo : Cálculo do suspension travel

```

1 Dados iniciais: Deslocamento vertical da suspensão secundária -
2  $DA_{esq}, DA_{dir}, DB_{esq}$  e  $DB_{dir}$ 
3 Resultado: Suspension travel -  $Susp_{travel}$ 
4 Inicialização do algoritmo
5     ▷ Obtém-se o maior valor de deflexão das duas células de carga da esquerda,
    considerando o sinal
6     ▷ Obtém-se o maior valor de deflexão das duas células de carga da direita,
    considerando o sinal
7
8 if  $max(DA_{esq}, DB_{esq}) \geq min(DA_{esq}, DB_{esq}) * -1$  then
9   |  $D_{esq} = max(DA_{esq}, DB_{esq})$ 
10  |  $D_{dir} = max(DA_{dir}, DB_{dir})$ 
11 else
12  |  $D_{esq} = min(DA_{esq}, DB_{esq})$ 
13  |  $D_{dir} = min(DA_{dir}, DB_{dir})$ 
14 end
15 ▷ Obtém-se o maior valor de suspension travel entre o valor da esquerda ( $D_{esq}$ ) e o
    valor da direita ( $D_{dir}$ ), considerando o sinal
16
17 if  $max(D_{esq}, D_{dir}) \geq min(D_{esq}, D_{dir}) * -1$  then
18  |  $Susp_{travel} = max(D_{esq}, D_{dir})$ 
19 else
20  |  $Susp_{travel} = min(D_{esq}, D_{dir})$ 
21 end
22

```

Figura 20 – Algoritmo para cálculo do parâmetro *Suspension Travel*

Fonte: Tudeia et al. (2019).

- c. **Bounce** (“galope”) – é o modo de vibração do veículo rígido no plano vertical, conhecido como *Bounce* (z), que ocorre normalmente em mudanças de rigidez na ferrovia. Conforme Figura 21, é calculado por meio da média do desvio da mola dianteira e traseira do vagão.

Algoritmo : Cálculo do *Bounce*

```

1 Dados iniciais Deslocamento vertical da suspensão secundária -
2  $DA_{esq}$ ,  $DA_{dir}$ ,  $DB_{esq}$  e  $DB_{dir}$ 
3 Resultado: Bounce
4 Inicialização do algoritmo
5 ▷ Obtém-se a média da deflexão das células de carga do rodeiro frontal ( $B_{frontal}$ ) e
   do rodeiro dianteiro ( $B_{traseiro}$ )
6
7  $B_{frontal} = \frac{DA_{dir} + DA_{esq}}{2}$ 
8  $B_{traseiro} = \frac{DB_{dir} + DB_{esq}}{2}$ 
9
10     ▷ Obtém-se o maior valor de Bounce entre o da esquerda e o da direita,
   considerando o sinal
11
12 if  $\max(B_{frontal}, B_{traseiro}) \geq \min(B_{frontal}, B_{traseiro}) * -1$  then
13 |    $Bounce = \max(B_{frontal}, B_{traseiro})$ 
14 else
15 |    $Bounce = \min(B_{frontal}, B_{traseiro})$ 
16 end
17

```

Figura 21 – Algoritmo para cálculo do parâmetro *Bounce*.

Fonte: Tudeia et al. (2019).

- d. **Alta Aceleração** – Ocorre usualmente em resposta a pequenos impactos ocasionados por mudanças na superfície do trilho (soldas desalinhadas, depressão nas juntas, perda de aderência no trilho). Utilizam-se acelerômetros uniaxiais instalados para medir dados do contato roda-trilho, sendo que o cálculo realizado para obtenção do valor de aceleração é demonstrado na Figura 22.

Algoritmo : Cálculo do aceleração do truque

```

1 Dados iniciais: Aceleração vertical dos quatro acelerômetros da travessa lateral -
2  $AcelA_{esq}, AcelA_{dir}, AcelB_{esq}$  e  $AcelB_{dir}$ 
3 Resultado: Aceleração vertical -  $Acel$ 
4 Inicialização do algoritmo
5     ▷ Obtém-se o maior valor de aceleração vertical lido, considerando o sinal
6
7 if  $max(AcelA_{esq}, AcelA_{dir}, AcelB_{esq}, AcelB_{dir}) \geq$ 
    $min(AcelA_{esq}, AcelA_{dir}, AcelB_{esq}, AcelB_{dir}) * -1$  then
8 |  $Acel = max(AcelA_{esq}, AcelA_{dir}, AcelB_{esq}, AcelB_{dir})$ 
9 else
10 |  $Acel = min(AcelA_{esq}, AcelA_{dir}, AcelB_{esq}, AcelB_{dir})$ 
11 end
12

```

Figura 22 – Algoritmo para cálculo do parâmetro de aceleração

Fonte: Tudeia et al. (2019).

De maneira geral, o conjunto total de sensores em cada vagão coleta dados a uma frequência ajustável (em Hz), de acordo com as premissas da gerência de manutenção. A gravação desses dados ocorre de forma contínua durante o movimento do vagão e é interrompida quando o vagão está parado. Os registros são transmitidos via Wi-Fi, conforme a disponibilidade do sinal, ou por rede 3G (TUDEIA *et al.*, 2019). Como resultado, há um grande volume de informações provenientes da leitura da via, estando além da capacidade humana de gerar respostas rápidas e análises consistentes. Portanto, neste caso se faz necessária a utilização de ferramentas e *softwares* da área da ciência de dados para compilação e avaliação das informações levantadas.

2.4 CIÊNCIA DOS DADOS

A Ciência dos Dados é uma resposta direta ao desafio enfrentado pelas organizações na era digital, pois lidar com a tarefa de extrair informações valiosas de dados não estruturados é um dos maiores obstáculos contemporâneos.

Combinando técnicas avançadas de análise de dados, *machine learning* e estatísticas, a Ciência dos Dados permite que as organizações compreendam seus dados em profundidade, capacitando as empresas a tomar decisões mais fundamentadas, otimizar processos, identificar

oportunidades de crescimento e enfrentar os desafios complexos do ambiente empresarial contemporâneo (IBM, 2023).

Neste cenário de crescimento exponencial dos dados e de crescente interação entre o mundo digital e o físico, a Ciência de Dados desempenha um papel vital ao capacitar as organizações a prosperarem e inovarem.

Para Dehkyar (2016), Ciência dos Dados é uma disciplina que permite tratar o ciclo de trabalho com os dados, considerando atividades que compreendem desde a aquisição destes, passando por sua análise, até o processo de apresentação dos dados e obtenção de novos conhecimentos. O ciclo do processo relacionado à Ciência dos Dados pode ser definido em 8 etapas, conforme Figura 23.

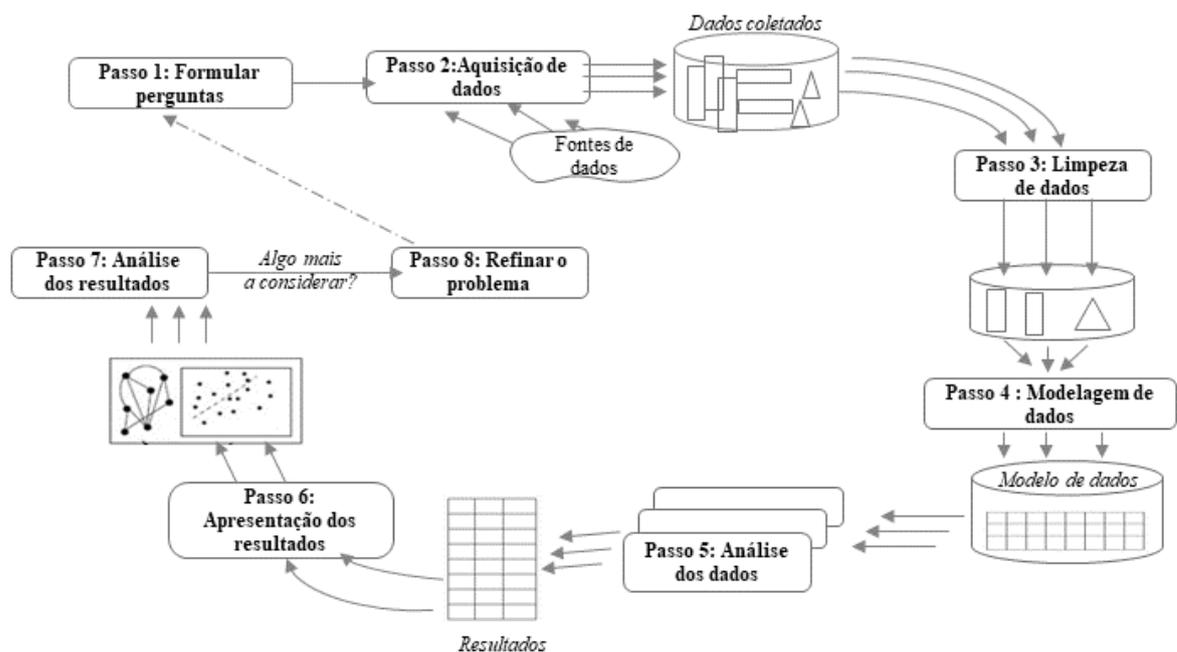


Figura 23 – Ciclo de vida dos dados conforme passos definidos Dehkyar (2016): Formulação de perguntas; Coleta/Aquisição de dados; Limpeza de dados; Modelagem de dados; Análise de dados; Visualização e Apresentação de Resultados; Análise de Resultados

Fonte: Adaptado de Dehkyar (2016).

O processo dos ciência de dados definido pelo Dehkyar (2016) é um ciclo contínuo que envolve várias etapas cruciais para extrair conhecimentos e *insights* valiosos dos dados. No início do processo, os cientistas de dados trabalham com partes interessadas para formular perguntas específicas que orientarão a análise. Com base nessas perguntas, os dados são adquiridos de várias fontes, tanto internas quanto externas, incluindo sensores e bancos de dados, por

exemplo. Os dados coletados podem ser imperfeitos e requererem limpeza e ajustes. Isso envolve a identificação e correção de informações desnecessárias, duplicadas, faltantes ou incorretas, bem como a normalização dos dados para atender aos requisitos da análise.

A fase de modelagem de dados envolve a preparação dos dados para atender às necessidades da análise. Isso inclui a criação de novas características, seleção de características relevantes e organização dos dados em estruturas apropriadas.

Os dados preparados são analisados usando uma variedade de técnicas, incluindo estatísticas avançadas e algoritmos de *machine learning*. O objetivo é extrair *insights* e conhecimentos que respondam às perguntas formuladas no início do processo.

Os resultados da análise são visualizados de maneira compreensível por meio de gráficos e relatórios, facilitando a comunicação dos *insights* para as partes interessadas. Com base nesses *insights*, decisões informadas são tomadas, afetando as operações do negócio ou orientando para aplicação de ações futuras.

Dados relevantes podem ser armazenados a longo prazo ou arquivados para referência futura ou conformidade regulatória. Ao mesmo tempo, dados obsoletos são excluídos de acordo com políticas de retenção para manter a eficiência e a conformidade. À medida que os resultados são revisados e avaliados, as perguntas iniciais podem ser refinadas com base nas informações obtidas. Essas ações podem desencadear um novo ciclo do processo de Ciência dos Dados, retornando à primeira etapa.

2.5 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA VIA

No campo da engenharia ferroviária existem preocupações no aspecto de gerenciamento dos ativos, envolvendo, por exemplo, predição de irregularidades da linha, a qual pode ser contemplada partindo-se de inspeções regulares, que possam registrar dados das condições da via em situações reais de uso; do trabalho com bancos de dados das auditorias realizadas, a fim de se caracterizar melhor a via e identificar comportamentos recorrentes; e da aplicação de modelos de *machine learning* para automatizar as ações de processamento com grande quantidade de dados, visando determinar a qualidade da via.

A geometria da via e a estrutura do pavimento ferroviário se interagem significativamente, porém, devido à maior facilidade de obtenção, os parâmetros geométricos da via são levantados

com maior frequência. Nesse cenário, os dados coletados podem ser posteriormente utilizados para calcular índices de qualidade, que ajudam a classificar a condição da via. Através das inspeções e dos índices de qualidade, é viável identificarem-se os pontos críticos e fornecerem-se informações adicionais para apoiar diagnósticos e decisões da gerência de manutenção (FARKAS, 2019; LI *et al.*, 2016).

Na literatura existem diversas metodologias para se atribuir de forma numérica uma representação quantitativa da qualidade da via, classificando-se a condição da via avaliada. Com base nesses rótulos, a gerência de manutenção pode, então, realizar o plano de intervenções e substituição de ativos da via.

Além disso, existe uma grande variedade de métodos para classificar e avaliar a qualidade das ferrovias com índices individuais, como o índice de desvio padrão (conhecido como *standard deviation* SD em inglês) do Reino Unido, índice de qualidade de via FRA (conhecido em inglês como *Track Quality Index* - TQI) e índices artificiais combinados como o índice holandês Q, TGI (em inglês *Track Geometry Index*) da Austrália, TQI Canadense, TQI Chinês, Coeficiente J Polonês, entre outros métodos elencados pelos trabalhos de Berawi *et al.* (2010), Liu *et al.* (2015), Rosyidi e Setiawan (2016), Offenbacher *et al.* (2020) e Yan e Corman (2020), Kassa e Segni (2022). Nos estudos evidencia-se essa variedade, e inclusive, a dificuldade de um consenso sobre procedimentos, parâmetros e equações adequadas.

No Brasil não há um índice de qualidade ou um método padronizado para se realizar o controle e planejamento. A normativa vigente, a NBR 16387 (2016), apenas define limites dos parâmetros individuais (como bitola, nivelamento, alinhamento, curvatura) para bitola métrica e larga, utilizando o carro controle como equipamento de inspeção direta automatizada.

Já em outros países, encontraram-se diferentes metodologias fazendo o uso desses equipamentos. Atualmente, os métodos mais aplicados pelas operadoras ferroviárias para cálculo de índice de qualidade da via são TQI e SD (JUNQUEIRA; MOTTA; OLIVEIRA, 2023).

Na normativa europeia, a EN 138488-5 (2008), o SD é calculado a partir da fórmula descrita pela Equação (4). O SD é um método que emprega conceitos de estatística para o cálculo do valor individual de cada parâmetro geométrico, em segmentos de via pré-determinados. O uso da estratégia de uma janela de inspeção em movimento permite uma análise adequada,

destacando a condição da via para o segmento avaliado. Pode ser ajustada conforme a janela de inspeção dos equipamentos utilizados ou práticas de trabalho (práticas da gerência de manutenção para divisão do ativo linear). Seu valor numérico simboliza a condição atual do segmento. Quanto maior o valor do SD calculado, pior é a sua condição para o parâmetro de geometria avaliado. Entretanto, o método acaba agrupando registros de segmentos não homogêneos que podem gerar valores não condizentes com a real condição do trecho.

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

Onde n é o número de defeitos medida no segmento de via, x_i é valor do parâmetro medido em cada ponto do segmento [mm], e \bar{x} é a média do parâmetro no segmento [mm].

A norma EN-13848-5 (2008) apresenta valores limites de alerta, intervenção e interdição da via para os parâmetros de geometria de via calculados através do SD. Pela facilidade de compreensão e de implementação, adotou-se o método para avaliação das condições da via. Ainda com referência às normativas vigentes na Europa, a norma europeia EN 13848-6 (2014), define outro método, o CoSD, como índice de qualidade global. Define-se o CoSD em uma equação ponderada da combinação de parâmetros geométricos da via (Equação (5)), com os valores de SD obtidos para alinhamento, bitola, alinhamento transversal e nivelamento longitudinal. De acordo com a EN 13848-6 (2014), os valores de ponderação (w_i) para cada parâmetro são definidos previamente pelo especialista da gestão de engenharia da ferrovia.

$$CoSD = \sqrt{w_{AL} \cdot SD_{AL}^2 + w_G \cdot SD_G^2 + w_{CL} \cdot SD_{CL}^2 + w_{LL} \cdot SD_{LL}^2} \quad (5)$$

Onde w_i é o valor de ponderação para cada parâmetro de geometria, SD é o valor do desvio padrão calculado para cada parâmetro de geometria, no caso alinhamento (AL), bitola (G), alinhamento transversal (CL) e nivelamento longitudinal (LL).

Nos Estados Unidos, padronizou-se o método TQI (Equação (6)), desenvolvido em 2004 pela FRA. Determina-se o índice de qualidade para ferrovias, comparando-se os comprimentos das curvas espaciais dos parâmetros geométricos medidos e seus comprimentos de curva ideais. Considera-se a segmentação de via de 528 pés (160,9 m) de comprimento e os seguintes

parâmetros geométricos: nivelamento longitudinal, alinhamento, nivelamento transversal e bitola.

$$TQI = \left(\frac{L_s}{L_0} - 1 \right) \cdot 10^6 \quad (6)$$

Onde TQI é o índice de qualidade da via [adimensional], L_s é o comprimento medido da curva espacial do parâmetro geométrico no segmento de via definido pela Equação (7), e L_0 é o comprimento teórico da curva espacial do parâmetro geométrico, ambos em pés.

$$L_s = \sum_{i=1}^n \sqrt{\Delta y_i^2 + \Delta x_i^2} \quad (7)$$

Onde Δy é a diferença entre duas distâncias verticais consecutivas, e Δx é a distância horizontal entre os pontos consecutivos da amostragem, ambos em [pés].

Nos Estados Unidos, a agência regulamentadora e fiscalizadora que define os limites de segurança para os parâmetros de geometria de via das ferrovias americanas é a Code of Federal Regulations – CFR (2021), além das classes de via e dos limites dos índices de qualidade da via (método FRA). O seu uso para o estudo em uma ferrovia brasileira já não é prático, pois a necessidade de adaptação no cálculo associado a maior restrição do método (padronização) comparado ao SD ou CoSD (mais flexíveis) dificulta seu uso e aplicabilidade nas condições brasileiras. Para este estudo, optou-se em se utilizar o método CoSD como parte das avaliações das condições do segmento analisado.

Outra forma de se avaliar a qualidade da via é por meio de veículos comerciais embarcados com sensores, porém de maneira geral, as agências fiscalizadoras não possuem orientações e normativas para uso desses equipamentos de inspeção indireta da via. Entretanto, esta é uma demanda emergente considerando-se sua aplicação em uma série de trabalhos desenvolvidos na última década, indicados na Tabela 2. É perceptível a variedade de equipamentos, mas também é evidente a recorrência de sensores e variação do seu posicionamento no veículo. Para o presente estudo, foram encontrados poucos trabalhos realizados para avaliação da via de ferrovias de transporte de carga (pois geralmente estão atrelados a casos de vias de alta velocidade, para se verificarem as condições do material rodante em relação ao conforto dos passageiros).

Tabela 2 – Levantamento de estudos realizados fazendo o uso de equipamentos de inspeção indireta da via

ESTUDO	ANO	PAIS	EQUIPAMENTO	SENSORES	POSIÇÃO DOS SENSORES	TIPO DE FERROVIA
Hardie <i>et al</i>	2011	Austrália	Vagão de minério instrumentado	Transdutor	Massa não suspensa	Transporte de carga
Tsunashima <i>et al</i>	2012	Japão	RAIDARSS-3	Acelerômetro, sensor de ruído, giroscópio	Carroceira e rodeiro	Alta velocidade
Tsunashima, Naganuma e Kobayashi	2014	Japão	Veículo Shinkansen serie 300 instrumentado	N.I	Carroceira	Alta velocidade
Dos Santos <i>et al</i>	2014	Brasil	Vagão GDU instrumentado	Transdutor	Truque, suspensão secundária, lateral da carroceira do vagão	Transporte de carga
Barbosa	2016	Brasil	Roda instrumentada	N.I	Roda	Transporte de carga
Thompson <i>et al</i>	2016	Austrália	Vagão de minério instrumentado	N.I	Caixa de suspensão do truque, massa não suspensa, carroceria, engate e tubulação de freio	Transporte de carga
Sadeghi, Heydari e Doloei	2017	Irã	Vagão ghazal instrumentado com truque MD523	Acelerômetros	Sobre o assento, encosto e piso do carro	Alta velocidade
Lingamanaik <i>et al</i>	2017	Indonésia	Carro comercial instrumentado	Acelerômetros, sensor de deslocamento de mola	Rodas, truque e carroceria do vagão	Transporte de passageiros
Sadeghi <i>et al</i>	2020	Irã	Vagão Danish 6-seat Grade 2 instrumentado com truque MD523	Acelerômetros	Sobre o assento, encosto e piso do carro	Alta velocidade
Sun <i>et al</i>	2021	China	Sistema de detecção a bordo	Acelerômetros	Rodeiro	Alta velocidade
Tsunashima e Takikawa	2022	Japão	Dispositivo com sensores de bordo	Acelerômetros e giroscópios	N.I	N.I
La Paglia <i>et al</i>	2023	Itália	Carro de passageiro instrumentado	Acelerômetros	Truque	Alta velocidade

*Obs: N.I. – não informado

De acordo com Bernal, Spiryagin e Cole (2019), a utilização de sistemas de detecção de falhas por meio de sensores embarcados representa uma abordagem eficaz para a inspeção mais precisa dos ativos ferroviários. O monitoramento em tempo real das condições dos materiais reduz as atividades de manutenção preventiva e corretiva ineficazes, ao mesmo tempo, em que melhora a disponibilidade e a segurança dos veículos ferroviários.

Além desse propósito, diversos autores também empregaram esses sensores para avaliar a condição da via férrea por meio das respostas geradas nos veículos, como demonstrado nos estudos apresentados Tabela 2. Dentre eles, destacam-se os trabalhos como de Thompson et al. (2016) e Hardie et al. (2011) que revelaram dispositivos muito semelhantes instalados no VI desta pesquisa, os chamados *Instrumented Ore Cars* (IOCs), para coletar grandes quantidades de dados (os quais podem abranger anos de registros ao longo do tempo). Nos artigos, além dos autores ressaltarem a importância do armazenamento em bancos de dados, Thompson et al. (2016) mencionam que a utilização dessas informações ao longo dos anos facilita as análises estatísticas e a mineração de dados, uma vez que existe um histórico contínuo de valores ao longo do tempo.

No estudo de Hardie et al. (2011) os dados armazenados pelo IOC foram empregados para priorização e planejamento das atividades de manutenção da via, com base em um sistema simples de três níveis de severidade. Esses níveis foram estabelecidos a partir de limites e tendências dos dados observados em diversas viagens realizadas.

Além de proporcionar uma validação da qualidade das intervenções de manutenção corretiva, de acordo com Hardie et al. (2011), a vasta quantidade de dados coletados facilita a identificação de padrões visuais de desgaste e deterioração na via. Esses padrões podem ser prontamente identificados devido à abundância de dados disponíveis, permitindo, assim, a determinação aproximada da taxa de degradação da geometria da via ao longo do tempo.

O estudo conduzido por Lingamanaik et al. (2017), realizado na Indonésia, também adotou uma estratégia de classificação dos dados em três níveis distintos, visando contribuir para a manutenção preditiva. Para o estudo foram instalados sensores estrategicamente em diversos pontos dos carros de passageiros em uma rede ferroviária local, sendo conduzidas medições durante os horários de pico de fluxo de passageiros.

Entretanto, os métodos específicos empregados para essa classificação não foram detalhados em ambos os trabalhos de Lingamanaik et al. (2017) e de Hardie et al. (2011), tornando difícil a replicação em estudos comparativos subsequentes. Além disso, aspectos importantes não foram abordados, como o critério de severidade da via em diferentes faixas de velocidade, já que a velocidade está diretamente relacionada à intensidade dos parâmetros levantados, e à variação do posicionamento do veículo da composição, que pode sofrer influência dos demais vagões ou das locomotivas presentes na composição.

Além da abordagem de classificação, Lingamanaik et al. (2017) também utilizaram um mapa de calor para rastrear as respostas dinâmicas mais significativas do carro, facilitando a identificação de possíveis irregularidades na via, com problema nas soldas e desgaste severo nos trilhos. Essas abordagens são interessantes para a visualização dos dados, pois permitem a criação de relatórios que correlacionam a posição do GPS a uma localização específica no mapa.

Com base nos trabalhos mencionados anteriormente, fica evidente uma correlação entre o comportamento dinâmico medido nos veículos e as características da geometria da via. Isso fortalece a argumentação a favor da eficácia de sistemas que utilizam vagões instrumentados para coleta de dados em tempo real.

Além disso, o uso de ferramentas de visualização de dados desempenha um papel importante na síntese da condição da via, tornando mais fácil a compreensão e identificação de segmentos com anomalias. Isso, por sua vez, auxilia no planejamento de manutenção, para que possa ser mais eficiente.

Algumas abordagens adotadas por autores como Nefti e Oussalah (2004), Pires *et al.* (2021), Shafiullah *et al.* (2008), Lasisi e Attoh-Okine (2018), Nadarajah *et al.*, (2018) incluem a aplicação de *machine learning* para criar modelos preditivos e classificadores de segmentos da via, utilizando os dados coletados por sensores embarcados em veículos comerciais. De forma similar, no estudo de Motta et al. (2023) empreendeu-se o desenvolvimento de uma ferramenta com aplicação de um modelo de *machine learning*, visando-se criar um modelo computacional classificador de severidade para os dados do VI. Para essa ferramenta, os autores adotaram a técnica do algoritmo de agrupamento de dados *K-means*, em que se particiona um conjunto de dados em k grupos (*clusters*). O processo começa com a definição do valor de k pelo usuário, e o algoritmo executa iterações até determinar um centro para cada *cluster*, conhecido como

centroide. Com base neles, cada observação é associada ao grupo cujo centroide está mais próximo, calculando a média das distâncias euclidianas. Embora o método tenha algumas limitações, como a necessidade de definir o valor de k antecipadamente e uma certa sensibilidade a *outliers*, o algoritmo *K-means* é amplamente utilizado devido à sua eficiência e simplicidade. Além disso, na literatura, não há evidências claras de que outro algoritmo de agrupamento apresente um desempenho significativamente superior.

Dessa forma, a construção do modelo empregado no estudo daqueles autores utiliza o conjunto de dados composto pelas medições do sensor VI, coletadas a cada segundo durante sua viagem (Equação (8)) e, com base na distância euclidiana, identifica grupos de conjuntos de dados com características semelhantes.

$$\text{Atributo A} = \{\text{aceleração, } \textit{suspention travel}, \textit{bounce}, \textit{body rock}\} \quad (8)$$

A leitura dos atributos do conjunto A ocorre em diversos instantes de cada viagem, ou seja, tem-se um conjunto de instantes conforme demonstrado pela Equação (9):

$$T = \{t_1, t_2, \dots, t_t\} \quad (9)$$

Onde t corresponde ao número de amostras do *dataset*.

O modelo também leva em consideração o conjunto de ocorrências registradas na via, pela equipe de manutenção da ferrovia, para associar cada agrupamento a um nível de severidade que reflete a condição da via. Como a modelagem para a aplicação de algoritmos de aprendizado de máquina supervisionado possui como característica a multidimensionalidade, as principais dimensões envolvidas foram espaço, tempo, ocorrências e leituras dos sensores. Portanto, cada conjunto de medições pode ser representado por um ponto neste espaço multidimensional.

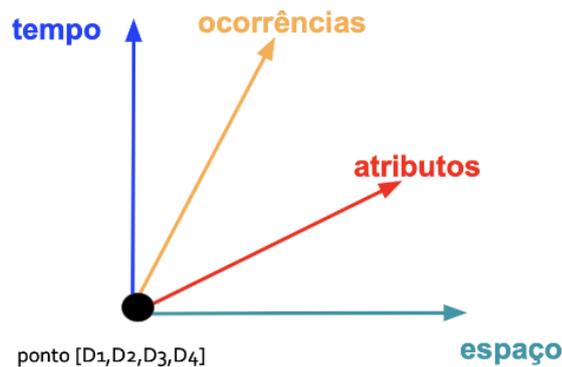


Figura 24 – Diagrama representativo das dimensões associadas para realização da modelagem utilizando algoritmos de agrupamentos de dados

No algoritmo *K-means*, começa-se por se determinar inicialmente o número de grupos desejados, e a cada passo da sua execução, o algoritmo procura encontrar as fronteiras entre esses grupos, mantendo uma relação de distância euclidiana entre os pontos. Isso pode ser exemplificado na Figura 25 , onde é apresentado um caso com um número de *clusters* $k = 4$.

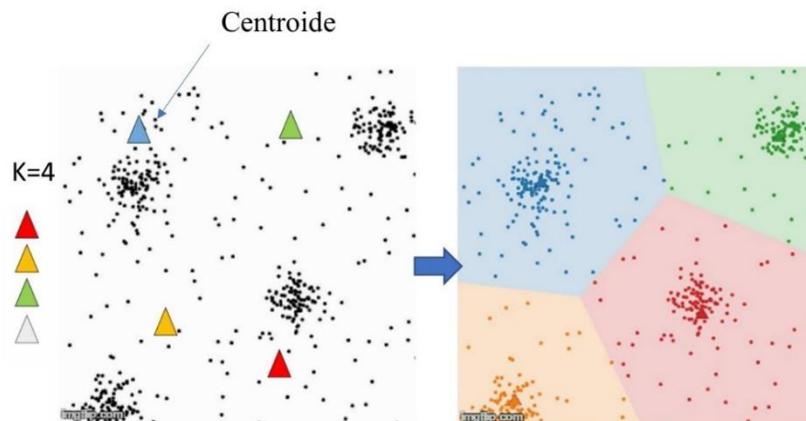


Figura 25 – Exemplo da aplicação do algoritmo de agrupamento *k-means* (para $k = 4$) para um determinado conjunto de dados

Quanto à atribuição de rótulos para os pontos de cada agrupamento, o modelo foi treinado utilizando a análise das características dos pontos em situações próximas a ocorrências geométricas registradas. Por exemplo, a Figura 26, se os pontos de um determinado agrupamento estão próximos a ocorrências registradas, é possível atribuir a esses pontos o rótulo de "severidade 1". Por outro lado, se outro grupo de pontos está distante de ocorrências, pode-se atribuir a esses pontos o rótulo "sem severidade", como ilustrado no exemplo. Deste modo, o modelo funciona como indicador da condição de via fazendo o uso de dados da dinâmica do vagão ao passar por cada elemento que a compõem. Este tipo de abordagem para

construção de indicadores são enfoques ainda pouco explorados na literatura, mas se observa um crescente interesse em pesquisas nessa perspectiva.

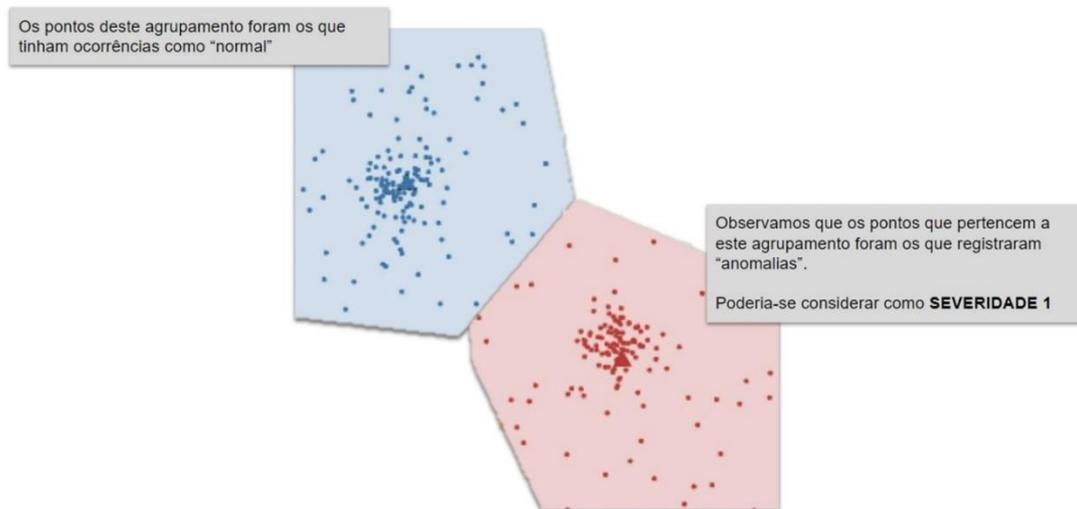


Figura 26 – Explicação de atribuição de rótulos aos agrupamentos

No processo de construção de novos modelos para indicadores, observaram-se as diretrizes estabelecidas pela *American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association* (AREMA), em seu relatório de 2020. Este relatório é de fundamental importância na definição dos métodos descritivos utilizados para a elaboração de Índices de Qualidade em sistemas ferroviários. O documento oferece diretrizes para avaliar e representar a qualidade da geometria da via, um aspecto crítico para a segurança e eficiência das operações ferroviárias. Dentre os métodos descritos pela AREMA, destacam-se: os revelam a condição mais crítica da geometria, representam a média do estado da via e descrevem a variação das condições ao longo do segmento. Esses métodos proporcionam uma compreensão completa das condições geométricas, como apresentados a seguir:

- a) Indicadores que revelam a pior condição de geometria em um trecho, como o valor mais elevado ou valores superiores a 95%. No entanto, é importante notar-se que um ponto de condição ruim pode impactar todo o segmento, e, portanto, esse indicador pode não refletir fielmente a condição global da via.
- b) Indicadores que representam a condição média da geometria em um trecho. É de se ressaltar que pequenos desvios no sistema de medição podem afetar significativamente os resultados devido a problemas de calibração.
- c) Indicadores que descrevem a variação das condições de geometria ao longo do segmento, incluindo o desvio padrão ou variação dos parâmetros de geometria, a média

dos valores absolutos de cada parâmetro ao longo do segmento e a representação em histogramas dos valores dos parâmetros geométricos.

Além desses métodos individuais, também são consideradas combinações de dois ou mais dos métodos mencionados no relatório da AREMA. Esses métodos descritivos oferecem uma compreensão abrangente da qualidade da geometria da via, viabiliza a comparação das mudanças de condições ao longo do tempo mediante as ações do tráfego, a definição de prioridades para manutenção e renovação da via, permite avaliar a qualidade e eficácia da manutenção da via e comparação relativa da condição geral entre diferentes segmentos da via. Portanto, a integração dessas diretrizes da AREMA com os novos modelos que veem sendo propostos se torna fundamental para uma avaliação precisa da condição da via ferroviária.

2.6 MANUTENÇÃO DA VIA

A manutenção é a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar a sua função requerida determinada em projeto, ou seja, em condições estáveis ao longo do tempo, garantindo as características de suporte, rolamento e guia do material rodante, dentro das tolerâncias em relação a sua geometria, e atender aos padrões de segurança (ABNT NBR 5462, 1994; SILVA, 2002). Portanto, caracterizando-se como atividade fundamental de seu sistema produtivo, focada na gestão otimizada dos ativos.

De acordo com Lasisi (2016), a manutenção de via é um termo que define um conjunto de atividades que abrange a renovação dos componentes/ativos ferroviários, tais como: estrutura da via (camadas que compõem o pavimento ferroviário), passagem de nível, geometria da via, geometria do trilho.

Faz parte do planejamento, a manutenção dos equipamentos, e componentes da infraestrutura e superestrutura ferroviária com o intuito de se diminuir as interdições e restrições de velocidade da via, e se relacionam com o tipo de abordagem realizada na ferrovia. Os gastos com manutenção possuem grande responsabilidade nos custos totais operacionais, que dependendo da indústria, pode chegar entre 15 a 60 por cento dos custos dos bens produzidos (CORRÊA JUNIOR, 2001; MOBLEY, 2002; PONTA *et al.*, 2021).

Segundo a ABNT NBR 5462 (1994), as atividades de manutenção, podem ser realizadas em diferentes momentos, podem ser distinguidas, em razão de suas naturezas e finalidades específicas, e podem ser classificadas na seguinte forma:

- Manutenção Corretiva (MC) – realizada após uma falha de um item/ativo. É a manutenção destinada a restabelecer as condições de desempenho de projeto, onde os serviços não são planejados e ocorrem de forma inesperada, levando a gastos maiores de recursos e impactos na produção;
- Manutenção Preventiva (MP) – efetuada em intervalos fixos de tempo, independente da condição do item/ativo já ter ou não um valor crítico de desgaste, ou conforme critérios prescritos. É efetuada antes de um dado sistema falhar ou diminuir seu desempenho, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um ativo/item. Com isto, viabiliza redução de custos, sem comprometer a segurança do tráfego, quando comparada com a MC;
- Manutenção Preditiva (PM) – também conhecida como manutenção controlada, que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, utilizando sistemas baseados em técnicas analíticas, de supervisão centralizada ou meios de amostragem, que determina o tempo mais preciso para a execução de uma intervenção, reduzindo despesas e minimizando as manutenções preventivas e corretivas. É, portanto, o melhor meio de melhorar a produtividade, qualidade do produto e a eficácia geral da produção.

De maneira geral, a engenharia de manutenção ferroviária emprega diversos níveis de severidade como parte de sua estratégia de controle de segurança e qualidade da via. Esses níveis de severidade são estabelecidos pelas empresas operadoras das ferrovias com base em vários parâmetros de inspeção considerados essenciais para garantir o funcionamento contínuo e seguro das vias. Esses parâmetros podem ser avaliados de forma isolada ou em conjunto.

A classificação por níveis de severidade é fundamental para categorizar a condição da via e, com base nessa classificação, a engenharia de manutenção determina as prioridades de intervenção, mobilizando equipes e equipamentos de acordo com as necessidades específicas. Em situações de severidade mais elevada, por exemplo, a engenharia de manutenção pode recomendar a interdição imediata da via ou impor restrições de velocidade até que inspeções in loco sejam realizadas para avaliação. Essas situações recebem prioridade máxima de atendimento.

É crucial ressaltar-se que, independentemente da natureza ou finalidade das intervenções, a atividade de manutenção deve sempre adotar as melhores práticas e técnicas disponíveis, com o objetivo de maximizar a disponibilidade, confiabilidade e vida útil dos ativos ferroviários.

3 ESTUDO DE CASO

Neste capítulo apresentam-se as principais características do objeto de estudo, seguidas pela abordagem dos equipamentos e ferramentas utilizados, bem como da metodologia adotada. O estudo de caso desta dissertação foi desenvolvido na Estrada de Ferro Vitória-Minas (EFVM), operada pela VALE.

Este trabalho fez parte de um projeto realizado pelo Laboratório de Inovação em Vias Metroferroviárias (LIM), em colaboração com um grupo de pesquisas especializado em *Big Data*, ambos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, em parceria com a VALE. O projeto tratou, dentre outros aspectos, da análise de vastos volumes de dados coletados por CC e por VI, que periodicamente percorreram a ferrovia, buscando identificar faixas de valores de parâmetros (ou combinações destes) que indicariam a necessidade ou não de manutenção corretiva ou mesmo preditiva da via férrea.

3.1 OBJETO DE ESTUDO

A Estrada de Ferro Vitória-Minas (EFVM) é operada pela VALE desde o ano de 1997, sob regime de concessão da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT). A EFVM une as cidades de Belo Horizonte (MG) e Vitória (ES), conforme a Figura 27.

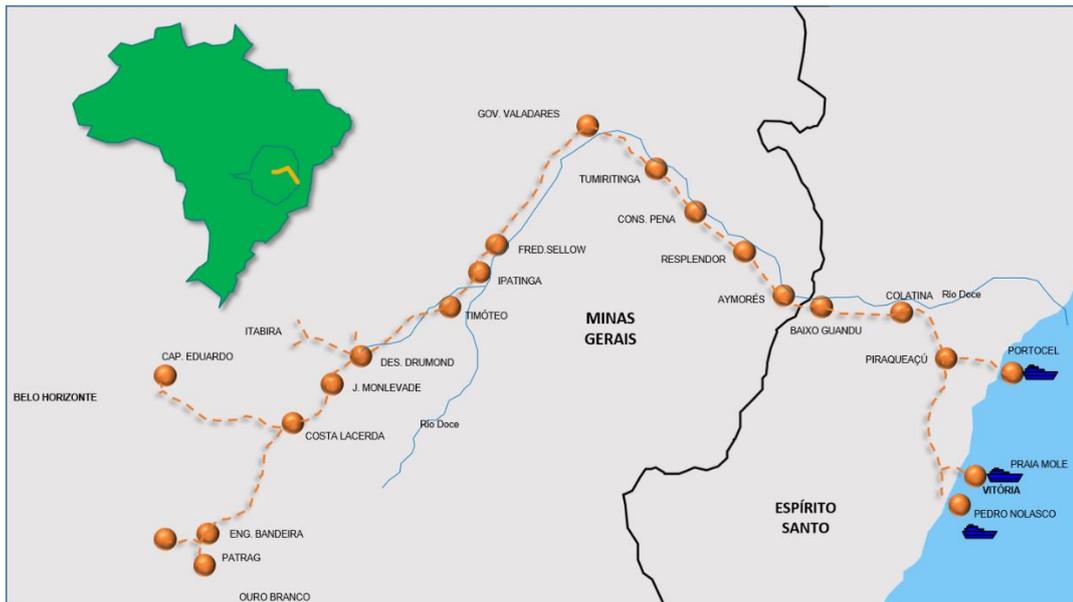


Figura 27 – Mapa da Estrada de Ferro Vitória-Minas

Além do transporte de cargas, a EFVM tem uma característica de ser uma ferrovia que realiza o transporte diário de passageiros (VALE, 2015). Abaixo são mencionadas, de forma sucinta, algumas características desta ferrovia:

- Extensão de 905 km;
- Ferrovia de linha dupla com entrevia de 3,5 m;
- Bitola métrica, trilho contínuo soldado (TCS) – TR-68, com dormentes de aço em sua maioria;
- Transporte de carga realizado tipicamente por vagão do tipo GDE, carregado com 110 toneladas (em média), com composições de cerca de 252 veículos, com velocidade média das viagens de 60 km/h.

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para esta pesquisa foram usados dados de geometria coletados de forma automatizada pelo CC e pelo VI ao longo do ano de 2020. Além disso, também foram coletadas informações de ocorrências da via (registrados de forma manual). Em seguida, são detalhadas a coleta e a visualização das informações de monitoramento obtidas a partir do CC e do VI.

É importante ressaltar-se que o conjunto de dados disponibilizados envolve diferentes atributos coletados pelo VI e CC. No entanto, para o primeiro equipamento, as análises foram

concentradas em 5 atributos considerados importantes, obtidos por medidas indiretas (resultantes da aplicação de uma relação matemática a partir dos dados dos sensores utilizados para detecção dos movimentos do vagão), enquanto que, para o segundo equipamento, foram classificadas as variáveis principais para o estudo, já que são parâmetros que podem identificar possíveis distúrbios geométricos, conforme apresentado na Tabela 3:

Tabela 3 – Atributos analisados para os equipamentos

Atributos calculados do VI		Atributos CC (mm)	
Variável (unidade)	Nomenclatura utilizada no dataset	Variável	Nomenclatura utilizada no dataset
i. Aceleração (g); ii. <i>BodyRock</i> (mm); iii. <i>Bounce</i> (mm); iv. <i>Suspention Travel</i> (mm); v. Velocidade (km/h).	i. <i>acceleration</i> ; ii. <i>BodyRock</i> ; iii. <i>Bounce</i> ; iv. <i>Suspention Travel</i> ; v. <i>velocity</i>	i. Bitola à frente e atrás; ii. Empeno na corda de 1,7 m; iii. Empeno na corda de 2,0 m; iv. Empeno na corda de 5,5 m; v. Empeno na corda de 10,0 m vi. Média do nivelamento longitudinal dos trilhos esquerdo e direito; vii. Superelevação; viii. Alinhamento na corda de 3 m; ix. Alinhamento na corda de 10 m; x. Variação da bitola em corda de 5 m; xi. Variação do alinhamento em corda de 3 m.	i. Bit. fre e Bit. tras; ii. Emp. 1,7; iii. Emp. 2,0; iv. Emp. 5,5; v. Emp. 10; vi. Niv. long.; vii. Supr; viii. Al. 3; ix. Al. 10; x. VarBit5; xi. VarAl3m.

Quanto ao aspecto da amostragem, foi realizado o levantamento totalmente automatizado em ambos os sentidos (Belo Horizonte-Vitória e Vitória-Belo Horizonte), com espaçamento de

25 cm para o CC, e de 10 Hz para o VI, sendo registrados apenas os dados de maior valor a cada 1 s para o VI. Cabe mencionar-se que, como esperado, ambos os equipamentos circulam com velocidades que variam ao longo da via.

A frequência do levantamento com o CC na EFVM geralmente é a cada 3 meses, enquanto com o VI a ideia seria utilizá-lo diariamente. Porém, com o uso do VI ainda em fase de adaptação, seus levantamentos à época estavam sendo realizados ainda sem frequência regular.

Dada a quantidade e frequência de coleta de dados do VI e CC, o volume de informação é bastante elevado, se fazendo necessário o uso de bibliotecas, ferramentas e *softwares* capazes de trabalhar com grande quantidade de dados. Para tanto, estabeleceu-se um ambiente computacional para gestão e análise dos dados, o qual foi empregado nesta pesquisa, com o sistema de processamento desenvolvido em nuvem (sistema Amazon Web Services - AWS).

Para a pesquisa, alguns trechos de código foram utilizados, sendo construídos para criar dashboards no *Streamlit*, com o intuito de se realizarem simulações avaliá-las graficamente de forma mais eficiente e dinâmica. A Figura 28 ilustra algumas ferramentas utilizadas no processo de manipulação dos dados até sua visualização, sendo todas em linguagem de programação Python como, por exemplo, bibliotecas listadas a seguir:

- Matplotlib - é uma biblioteca bem vasta para plotar de gráficos 2D de matrizes. Permite uma boa visualização da grande quantidade de dados em recursos visuais de fácil compreensão;
- Seaborn - é uma biblioteca de visualização de dados do Python baseado no Matplotlib. Ele provê uma interface de alto nível para construção de gráficos estatísticos informativos. Seaborn é integrado com as estruturas de dados do Pandas;
- Pandas- é uma biblioteca para manipulação e análise de dados, escrita na linguagem Python, usada para análise exploratória de dados. Tem código aberto, flexível e fácil utilização;
- Numpy - foi escolhido por ser uma ferramenta fundamental para a Ciência dos Dados. É usada para cálculos em *arrays* multidimensionais, fornece grande conjunto de funções e operações de biblioteca para realização cálculos matemáticos a até criação de modelos de *Machine Learning*;
- Scipy – Também é uma biblioteca com ferramentas destinada a operar de forma efetiva em matizes Numpy com grande quantidade de números;

- Scikit-learn – possui uma biblioteca muito importante para se trabalhar com aprendizado de máquina. Com ele é possível utilizar técnicas que simplificam o desenvolvimento do código;
- Geopandas, Fiona Gdal, que auxiliam para o georreferenciamento entre outros.

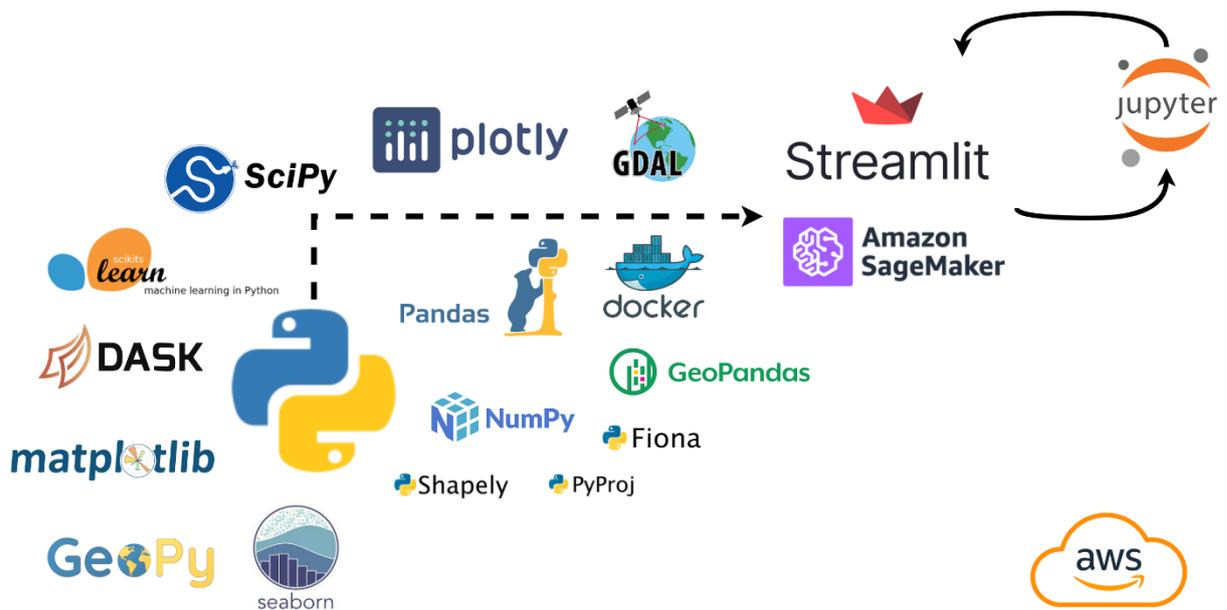


Figura 28 – Principais ferramentas e bibliotecas em Python utilizadas.

De forma resumida, a dissertação foi realizada a partir de dados fornecidos pela VALE, contemplando os levantamentos registrados pelo vagão instrumentado e carro controle, planilhas com ocorrências na EFVM e coordenadas dos ativos ferroviários. Características como intervalos, registros e quantidade de atributos, referentes aos *datasets* empregados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Características dos *datasets* empregados

DATASET	INTERVALO		TIPO	Nº DE REGISTROS	ATRIBUTOS
	INÍCIO	FIM			
<i>Compilados viagens do Vagão instrumentado</i>	01/03/2020	30/08/2020	xlsx	665.009	14
<i>Compilados viagens carro controle</i>	03/02/2020	18/12/2020	xlsx	35.946.033	40
<i>Anomalias</i>	01/01/2020	31/12/2020	xlsx	3.523	50
<i>Coordenadas dos ativos ferroviários</i>	-	-	xlsx	27.189	9

O método chamado científico, também conhecido como método de engenharia, define uma abordagem para formular e resolver problemas, que se aplica para testar as teorias ou hipóteses. O mesmo pode ser sucintamente descrito nos seguintes passos: (i) formula-se a questão que norteia o problema de forma clara; (ii) identificam-se fatores relevantes que estão diretamente relacionados ao objeto de questionamento, coletando as informações necessárias; (iii) conduzem-se experimentos apropriados e coleta de dados para se obterem conclusões, mesmo que de forma parcial; e (iv) se for necessário, repetem-se os passos anteriores ou refina-se o modelo/hipótese com base nos dados observados (MONTGOMERY; D.C. e RUNGER, G.C. 2009; MORETTIN; BUSSAB, 2017). Tendo o método científico como base, definiu-se, portanto, a metodologia aplicada a este estudo, cujas etapas empregadas são apresentadas pelo fluxograma de trabalho na Figura 29.

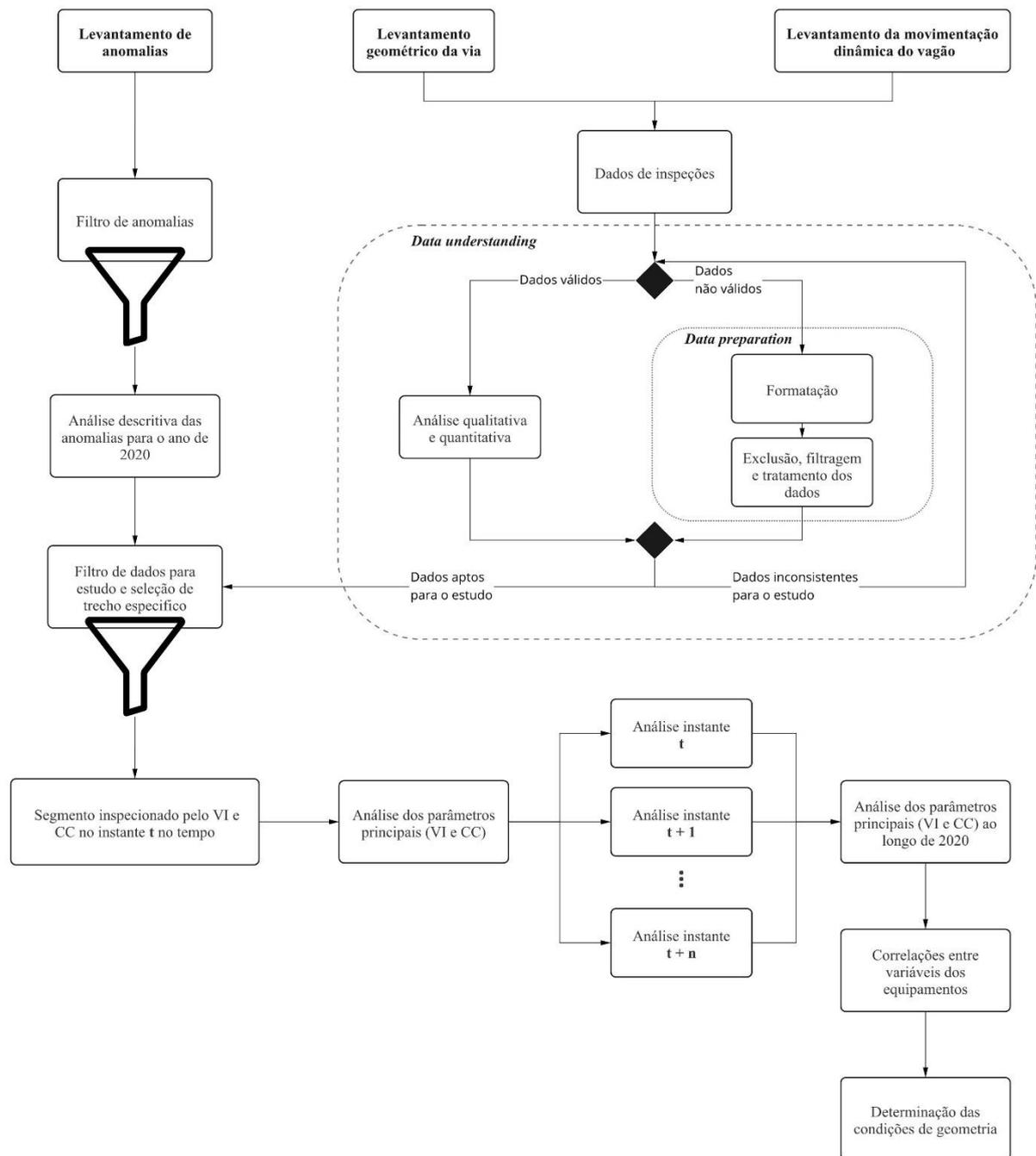


Figura 29 – *Workflow* aplicado para estudo

A partir dos dados disponibilizados de anomalias registradas ao longo do ano de 2020 pela equipe de manutenção da EFVM foi feito um processo de triagem de dados, apurando-se somente os problemas que estavam diretamente correlacionados às anomalias geométricas e estruturais da via, removendo-se, assim, registros como queda de árvore, vandalismo, obstrução da via, incêndio, entre outros casos.

Após o processo de triagem inicial, foi realizada uma análise descritiva dos dados remanescentes, a fim de se extraírem informações que podiam ser relevantes ao estudo. Sendo assim, verificou-se a possibilidade de se encontrarem trechos onde havia maior frequência desses registros para eleger os que seriam estudados no trabalho com mais detalhes.

Por meio deste procedimento de eleição do melhor segmento foi criado um filtro de registros baseando-se nas informações de georreferenciamento contidas no *dataset* de anomalias. Posteriormente, o mesmo foi aplicado no conjunto de dados de inspeção, a fim de separá-las apenas para as regiões de interesse.

Já os dados de inspeção são os registros agrupados provenientes dos levantamentos geométricos da via e da movimentação dinâmica do vagão.

Logo após a aquisição dos dados e compilação em *datasets* únicos, houve essa necessidade de se compreenderem os registros disponíveis para a EFVM, um processo importante para se identificarem e se reunirem os recursos de informações disponíveis relevantes. Como para o projeto foram pré-determinados os dados a serem coletados pelos equipamentos, partiu-se, portanto, para a etapa de entendimento dos dados (*data understanding*), seguida da etapa complementar de preparação dos dados (*data preparation*), que envolve atividades como formatação, padronização e tratamento, excluindo-se dados faltantes ou aplicando-se alternativas para se atenuarem esses problemas.

A etapa de *data understanding* consiste na análise das *features* de cada *dataset* utilizado no estudo. É denominada a etapa de caracterização ou análise exploratória dos dados (DEHKTYAR, 2016).

A análise exploratória envolve a caracterização de cada um dos atributos (variáveis) numéricos e categóricos, visando-se extraírem-se suas medidas descritivas citadas a seguir (FACELLI et al., 2012):

- Frequência, para avaliar a proporção que um atributo assume um dado valor;
- Localização ou tendência, para se avaliarem valores/locais de referência dos dados (média, mediana, percentis);
- Dispersão ou espalhamento de um conjunto de valores (intervalo, variância, desvio padrão);

- Distribuição ou formato de avaliação de histogramas, para se identificar uma família particular de distribuições com o propósito de modelagem;
- Correlação, para se fazer uma avaliação multivariada entre dois ou mais atributos (matriz de correlação e análise de componentes principais).

A partir dessas análises é possível verificar-se a consistência dos dados, avaliar-se a qualidade das informações contidas e compreender-se as variáveis presentes.

Já a etapa de preparação dos dados *data preparation* se caracteriza pelo estágio que mais consome tempo do projeto, sendo que nesta fase são realizadas as atividades para se construir o conjunto de dados que será usado para o estudo.

Para realização de modelos de *machine learning*, por exemplo, se faz necessário organizar-se todo o conjunto de dados dos diferentes *datasets*, além de formatá-los e padronizá-los, permitindo-se aplicarem-se as técnicas de programação e viabilizar-se a criação do modelo do experimento. As atividades consideradas principais nesta etapa consistem na limpeza e pré-processamento dos dados (*data clean e preprocessing*). Em geral, compreende a remoção de *outliers*, solução para os dados faltantes (*missing data*) e para os caracteres especiais, além de entendimento dos ruídos dentro do conjunto, remoção de colunas e/ou linhas das planilhas redundantes ao estudo, reclassificação das categorias das variáveis, normalização e verificação de correlações entre os atributos.

Para este estudo, em casos de dados incorretos, a estratégia foi removê-los para não afetar ou prejudicar as análises realizadas. Ou seja, quando encontrados, as respectivas linhas dos *datasets* foram excluídas. Para dados faltantes, a estratégia dependia da situação encontrada: em alguns casos foi aplicado de forma semelhante ao procedimento anterior, e, em situações de problemas de georreferenciamento, foi construído um modelo linear de referência próprio (em inglês *Linear Reference System*, ou LRS), a partir do conjunto de dados do cadastro de todos os elementos que compunham a via, para se assegurar a localização exata de cada registro. Já para *outliers* utilizou-se variação interquartil (IQR) para eliminação dos mesmos da matriz de entrada.

Os conjuntos de registros provenientes dos levantamentos do VI não possuíam rótulos conhecidos para se definir a condição da via. Esta situação caracterizava um problema de classificação não supervisionado, onde a solução usual neste caso envolvia o uso de algoritmos

de agrupamento (*clustering*). Assim, foi adotada a ferramenta *DataMap* para o estudo, com a seleção prévia dos dados, adotando-se o critério para se avaliar apenas para a linha corrida. Elementos como aparelhos de mudança de via (AMVs), juntas isolantes coladas (JICs) e pontes foram excluídos, por serem considerados pontos onde a movimentação do vagão apresenta como padrão valores com maior intensidade que os comparados com linha corrida. Sendo assim, necessário realizar-se um estudo à parte para esses casos. Apesar desse filtro, mais de 93% do conjunto total de dados continuaram aptos para o experimento. É relevante destacar-se que esse filtro foi aplicado com base nos dados fornecidos pelo conjunto de dados "Coordenadas dos Ativos Ferroviários". É importante salientar-se que os dados relacionados aos AMVs presentes no *dataset* fornecem informações daqueles que estão localizados apenas fora das regiões de RH (*relay house*). Como essas regiões não foram excluídas para o estudo, isso pode resultar em uma pequena contaminação dos dados.

4 RESULTADOS

Neste capítulo, apresenta-se os resultados obtidos por meio de análises detalhadas e experimentos utilizando a metodologia definida no capítulo anterior. As análises preliminares provenientes da etapa de *data understanding* seguem a partir dos dados referentes aos *datasets* originais. Optou-se por se realizar primeiramente os registros do VI com o intuito de se compreender melhor o funcionamento deste equipamento de inspeção.

Isto posto, no estudo foram identificadas as inspeções realizadas pelo VI ao longo do ano para toda a ferrovia. A partir da mesma, obtém-se a Tabela 5, onde se define a quantidade de viagens realizadas em cada mês e sua respectiva quantidade de registros.

Tabela 5 – Inspeções realizadas pelo VI ao longo do ano de 2020

Mês	Quantidade de dados	Identificação da viagem (<i>Trip_Id</i>)	Quantidade de viagens
Março	2913	1;3;4	3
Abril	1000	5	1
Junho	1238	7;8	2
Agosto	3810	9;10;11;12;13	5
Dezembro	136	14	1

*Obs: as viagens 2 e 6 foram descartadas por problemas técnicos nos sensores.

Nesta parte do estudo foi feita uma análise utilizando-se estatística descritiva de cada atributo, com a finalidade de se compreender o comportamento de cada variável e se identificarem possíveis padrões. Para tanto, separaram-se as categorias dos dados disponíveis em dados numéricos e categóricos. Os dados numéricos consistem em todas as categorias que apresentam um número como valor (como velocidade, aceleração). Já os atributos categóricos (como linha, identificação da viagem), são considerados do tipo objeto.

Também fizeram parte do processo de análise as variáveis de identificação eh-rh (entre *house* e/ou *relay house*), *line* (linha), *trip_id* (identificação da viagem) do tipo qualitativo nominal de categoria independente. Após a limpeza aplicada no *dataset*, foram realizadas novamente as análises estatísticas descritivas e de correlação. Desta forma, procedeu-se com a avaliação dos seguintes atributos: (i) aceleração (g), (ii) *BodyRock* (mm), (iii) *Bounce* (mm), e (iv) *Suspention Travel* (mm). Para cada um são apresentados na sequência:

- a. *Boxplot*;
- b. Gráfico de dispersão de valores;
- c. Gráfico de frequência de valores;

Em relação aos dados brutos do atributo aceleração, os resultados são mostrados na Figura 30, respectivamente, gráfico *boxplot* e de densidade e frequência do atributo. Verificam-se os valores mínimo e máximo da aceleração superiores a ± 100 (-105,4 e +102,8). Identificou-se a existência de ruído, já que, segundo o fabricante do sensor, este permite leituras de ± 100 g. No que se refere às porcentagens dos quartis e demais medidas, houve influência dos valores negativos, de modo que tenderam a zero. Cabe mencionar-se que se observou comportamento análogo em relação à forma como os valores de aceleração estavam concentrados (Figura 30a). A presença de *outliers* é bastante expressiva e pela dispersão identifica-se que a distribuição não possui simetria. Em geral, essas análises são importantes, se faz necessário definirem-se formas para identificação da causa de tais amplitudes, além de nortear a definição de valores aceitáveis de aceleração.

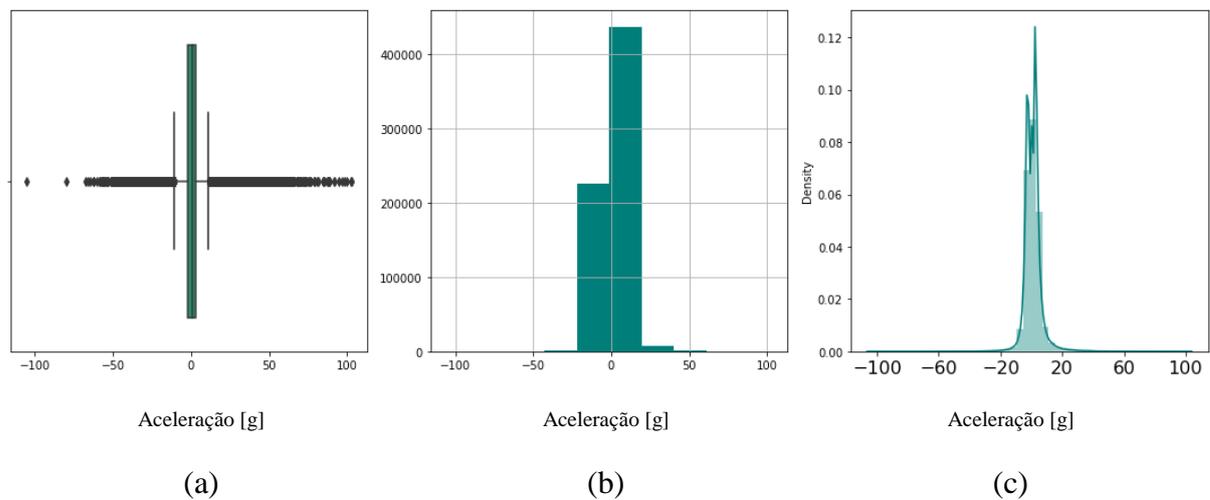


Figura 30 – (a) Gráfico *boxplot*, (b) gráfico de histograma vertical e (c) gráfico de densidade para o atributo aceleração, em g, de todas as viagens analisadas que foram realizadas pelo VI em 2020

Em relação aos dados do atributo *BodyRock* os resultados analisados são mostrados na Figura 31, respectivamente, gráfico *boxplot* e de densidade e frequência do atributo. Nota-se que os valores mínimo e máximo de *BodyRock*, estão dentro do intervalo de cerca de +72 a -481. A visualização gráfica para este atributo permitiu verificar a presença desse valor extremo negativo incoerente, que, em contrapartida, prejudicou a visualização da dispersão e distribuição dos registros para o parâmetro.

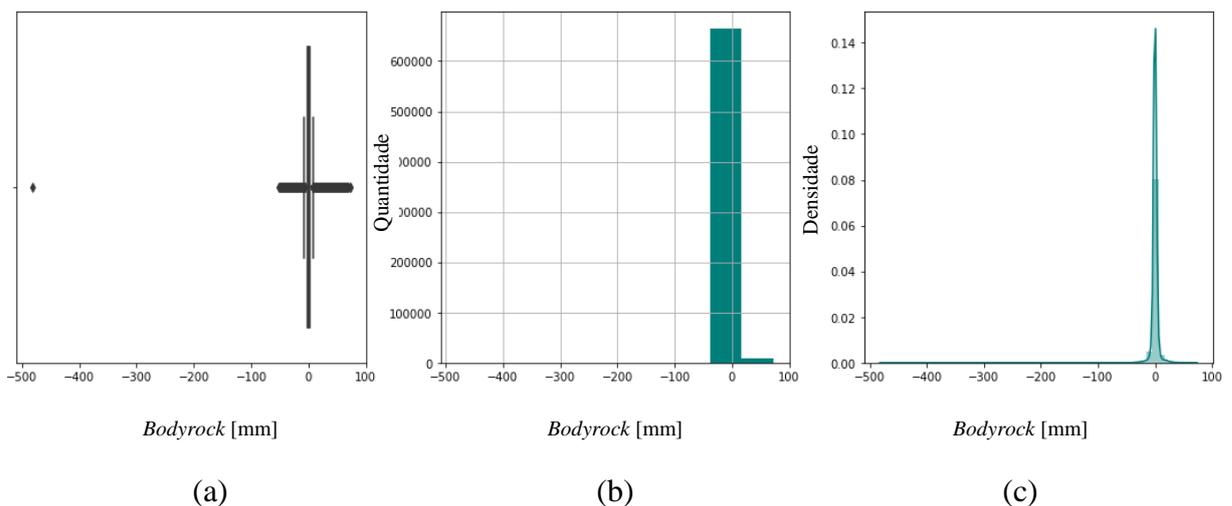


Figura 31 – (a) Gráfico *boxplot*, (b) gráfico de histograma vertical e (c) gráfico de densidade para o atributo *BodyRock* de todas as viagens analisadas que foram realizadas pelo VI em 2020

De forma investigativa, como a máxima deflexão da mola utilizada é de 137,16 mm (a qual depende da carga transportada no vagão e da força registrada na célula de carga) há evidências que indiquem que o valor discrepante é um ruído, visto que ultrapassou o limite do sensor. Os

demais atributos foram avaliados seguindo-se o procedimento realizado para a aceleração e são apresentados no Apêndice B deste documento.

Foram avaliadas as relações (lineares ou monotônicas) entre as principais variáveis, com a finalidade de se encontrar o grau de intensidade dessas relações e de se comparar as variações dessas correlações. Para os dados de 2020 de toda a ferrovia geraram-se os gráficos em mapa de calor (*heatmap*) para correlação de Pearson (Figura 32). A relação forte foi identificada entre o atributo *Bounce* e *Suspention Travel*, com valor de 0,89, havendo ainda uma relação de intensidade menor entre *BodyRock* e *Suspention Travel* de 0,26. Pode-se dizer que esses resultados eram esperados, em função da dinâmica oscilatória do vagão descrita na seção 2.2. Para os demais atributos, os valores estão próximos de zero, o que indica que não houve relação constatada. De maneira geral, essas relações são coerentes, já que esses atributos dependem diretamente das medições de deslocamento vertical da suspensão secundária do vagão GDE.

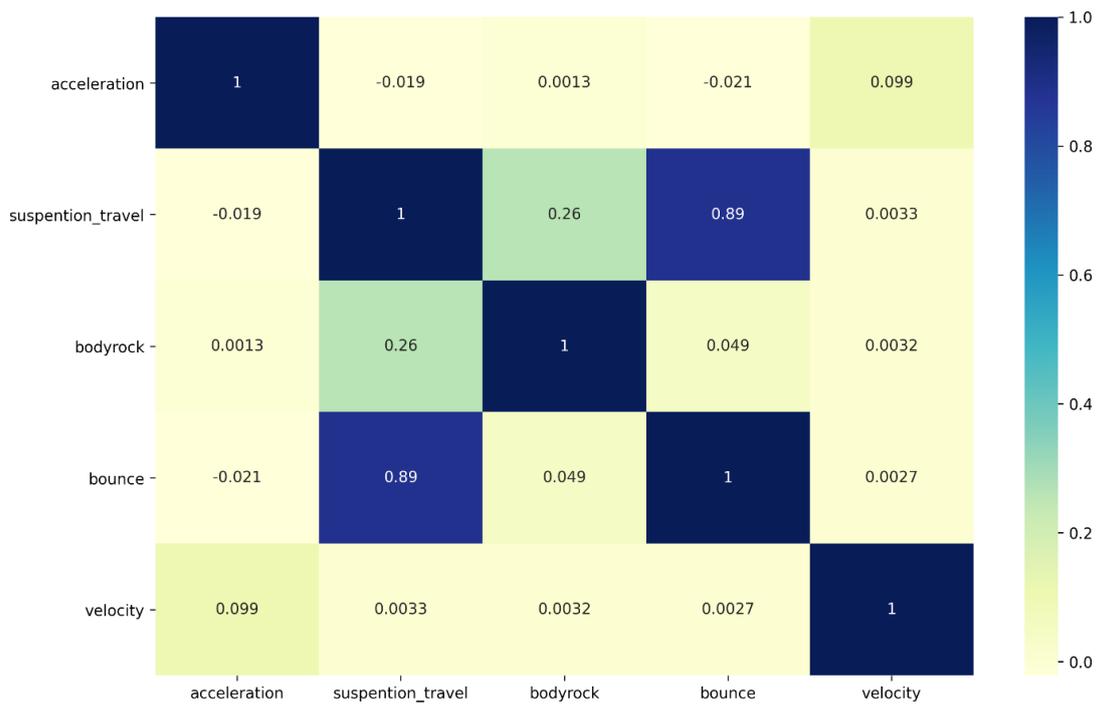


Figura 32 – Representação gráfica em mapa de calor da correlação de Pearson para os atributos principais do VI

Antes de prosseguir com a metodologia do trabalho, é importante frisar-se a existência de fatores não controláveis para o (como, por exemplo, a garantia da mesma posição do vagão nas composições e intervalo entre as viagens), principalmente para o conjunto de dados do VI, onde tais agentes prejudicam inferências mais precisas sobre o levantamento com este equipamento. Algumas variáveis podem impactar diretamente na aquisição dos dados, como as mudanças no

georreferenciamento dos registros para as diferentes viagens. Ou seja, observou-se que a quilometragem utilizada pelo *dataset* apresentou inconsistências em alguns pontos do levantamento, variando os valores de viagem a viagem. Portanto, foi necessário o desenvolvimento de um sistema linear de referência próprio para identificar com maior veracidade o ponto onde foi realizado o registro dos parâmetros. A finalidade deste sistema não foi apenas auxiliar no uso do *dataset* de viagens do VI no período do estudo, mas também viabilizar o uso de qualquer dado registrado na EFVM independentemente do padrão, do ano de aquisição do registro do *dataset*, ou de possíveis erros de leitura presentes em tais viagens.

Sendo assim, a ferramenta LRS foi implementada na pesquisa, fazendo com que ambas as vias fossem referenciadas por coordenadas geográficas para um número escalar, representando uma posição na EFVM. Por exemplo, pode-se traduzir as coordenadas cartesianas $-20,246650$; $-40,258098$ do *dataset* para a posição $0,270561$ no LRS, e vice-versa. Deste modo, todo e qualquer elemento que compõe a EFVM (como curva e tangente, por exemplo) pôde ser referenciado a partir de sua posição na via, viabilizando a aplicação de filtros e comparações de viagens do VI. Mesmo assim, os registros do VI apresentaram *gaps* de dados, em consequência da imprecisão do GPS. Eles são georreferenciados para um intervalo de espaço, e para viabilizar a visualização em mapas e gráficos, quando aplicado o LRS esse intervalo passa a ser um único ponto da via. Este processo auxilia a viabilizar o uso desses registros, mas, ao mesmo tempo, prejudica em situações em que são necessárias análises mais minuciosas para segmentos com grande quantidade de lacunas.

Há outros fatores não controláveis presentes, mas que são de difícil mitigação e podem afetar as avaliações devido à dificuldade de se obterem informações mais detalhadas. São variáveis como: sentido das viagens; posicionamento do vagão nas composições; carga do vagão; meteorologia; distribuição temporal dos dados.

A seguir, ilustra-se na Figura 33 a distribuição total dos dados disponibilizados pelo equipamento VI, CC e de registros de ocorrências para realização do estudo. Não há uma sincronização dos levantamentos, ou seja, os registros obtidos por um dos equipamentos não foram igualmente adquiridos para o outro equipamento no mesmo dia ou mês, na mesma seção, com exceção do mês de junho daquele ano. Tal fator prejudicou uma análise mais precisa de correlação entre eles, mas em um caráter exploratório, ainda foi possível avaliar-se o

comportamento dos dados de uma inspeção direta em comparativo à inspeção indireta, de maneira mais próxima.

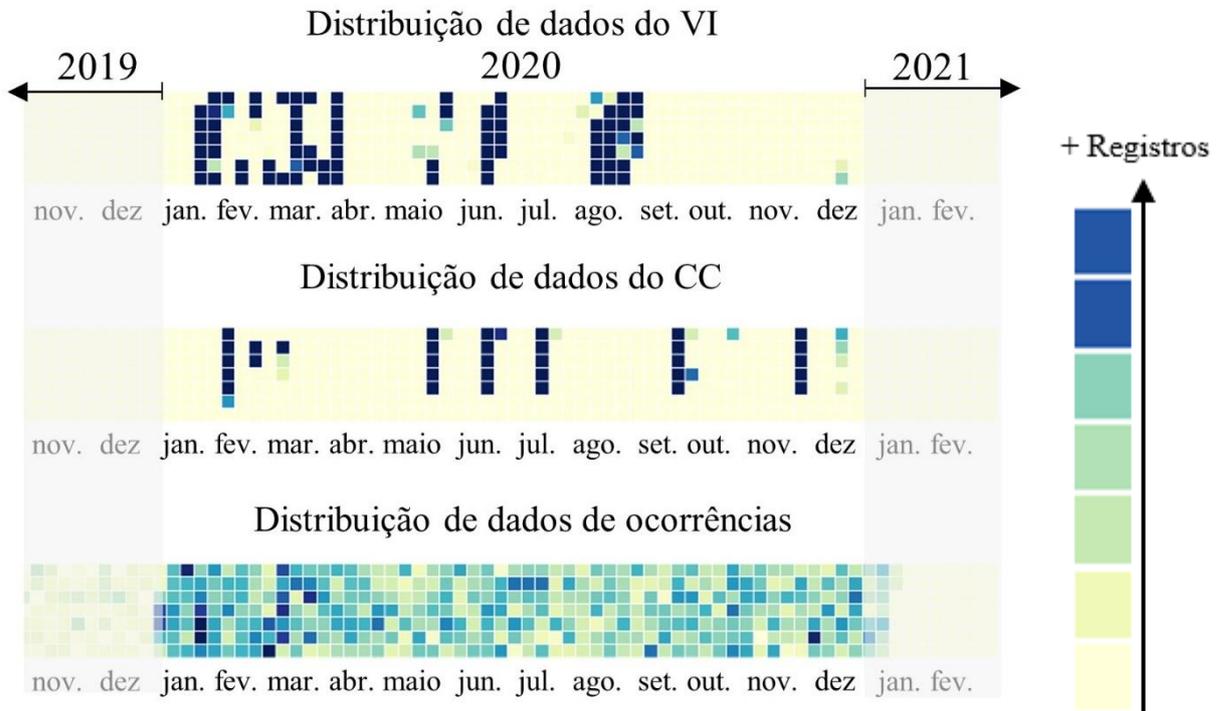


Figura 33 – Gráfico de mapa de calor para a distribuição de dados para os diferentes *datasets*

Adicionalmente, considerando-se que um desafio do trabalho seria a dificuldade de se manipularem os dados pela grande quantidade de informações e capacidade de processamento computacional, além da visualização nos diferentes *datasets*, pela grande matriz de dados, optou-se por se usar ferramentas em *dashboard* com processamento em nuvem. Com relação à melhor alternativa identificada para se atenuar o obstáculo da visualização, o uso de mapas se mostrou interessante para se localizarem os registros ao longo da ferrovia, bem como as análises gráficas se mostraram úteis para se observar o comportamento dos registros.

Por conseguinte, a partir da metodologia proposta foi confeccionada uma ferramenta de *dashboard* no *Streamlit* (Figura 34), utilizando-se o *Python* e suas bibliotecas próprias para se importarem as ferramentas de análise e estrutura de dados, de forma a se atenderem às necessidades de simulação e extração de informações de forma efetiva.

Password

.....

Simulation Experiment -IW

Date range

1 31

1 31

Month range

1 12

1 12

Line

L1 X L2 X

Select all VI trips

Trip

11 X 12 X 13 X 14 X

Origin EH/RH

67/68

End EH/RH

67/68

Use KM filter

KM inicial

442 - +

KM final

452 - +

Figura 34 – Tela inicial do *dashboard* programada em Python utilizando a ferramenta *Streamlit*

Fazendo-se o uso desta ferramenta construída para o trabalho e com auxílio da plataforma visual do *Tableau* e do *DataMap* foi possível avaliar-se o conjunto de dados no estudo de caso por estatística descritiva e por gráfico de *heatmap* de correlação para todos os atributos do *dataset*. A avaliação do *dataset* de anomalias permitiu a criação de filtros para seleção do trecho a ser melhor estudado, visando-se a comparação das repostas da dinâmica do VI com os parâmetros geométricos do CC.

Como comentado na metodologia, em um primeiro diagnóstico verificou-se que diversos registros contidos no *dataset* não possuíam valor para este estudo, tais como vandalismo, queda de árvore, queda de placa de sinalização, incêndio na faixa de domínio, entre outros. Portanto, um processo de filtragem manual em todo o conjunto de dados de ocorrências foi realizado para se eliminarem as linhas de planilha com esse tipo de informação, priorizando-se as que continham referências sobre anomalias constatadas que afetariam diretamente o suporte e/ou a geometria da via. Foi possível realizar-se essa seleção devido à descrição dos eventos encontrados ao longo das viagens das composições pelos maquinistas, como alerta de material sobre a via e balanço elevado durante a circulação das composições em determinado trecho. Além disso, havia registro de inspeções visuais que identificaram, por exemplo, a presença de

dormentes quebrados. Sendo assim, tentou-se associar cada ocorrência ao possível ativo com distúrbio, por meio de um processo de validação da informação *a posteriori* com tais dados das inspeções. Como resultado desta etapa inicial, dos 3523 registros que compunham o *dataset*, apenas 321 foram considerados aptos após este processo de filtragem.

Com os dados remanescentes agruparam-se as ocorrências de um dado elemento ou fator (por exemplo, trilho ou geometria), chegando-se à distribuição percentual no período de análise desses registros (Figura 35).

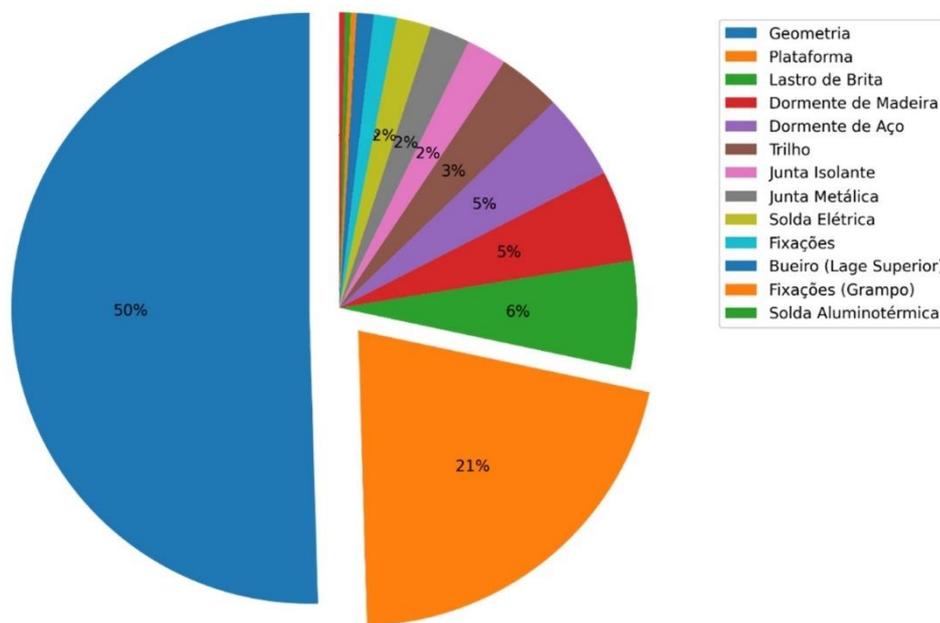
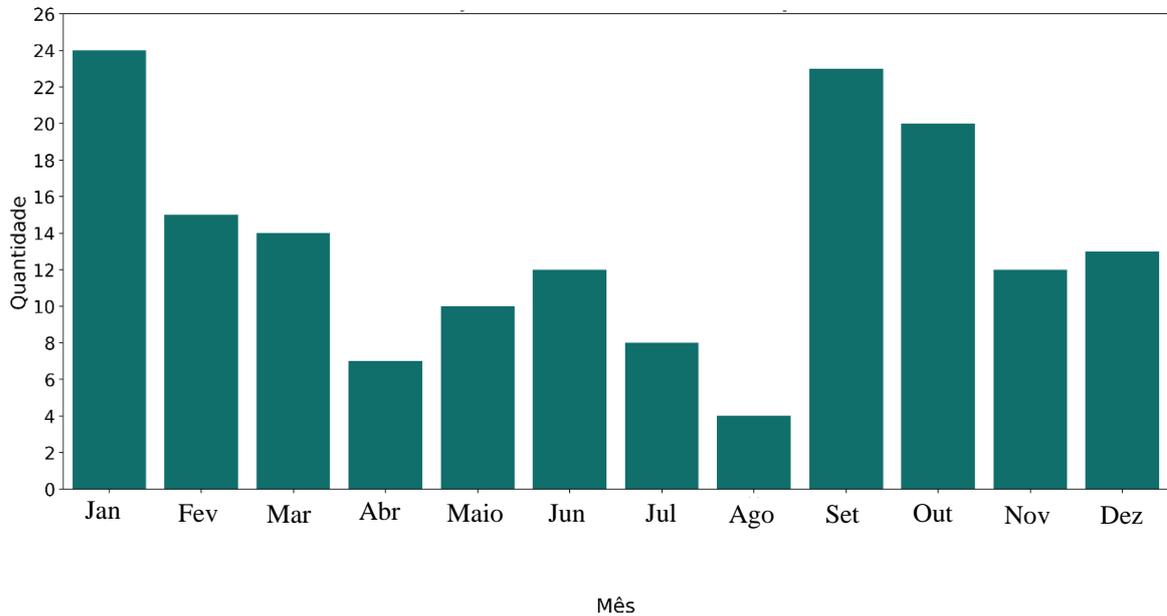


Figura 35 – Distribuição das anomalias registradas por maquinistas e inspeções visuais no período do estudo

Conforme observado, ficou claro que as anomalias mais identificadas no período da pesquisa foram ocorrências associadas à questão geométrica (desvios em parâmetros geométricos da via, como alinhamento, bitola e nivelamento) e à plataforma (como, por exemplo, recalque e lastro colmatado).

Tendo em vista que a plataforma ferroviária poderia eventualmente ser suscetível à entrada de água no pavimento e, assim, levar à ocorrência de uma anomalia associada a ela e, por consequência, à geometria, em um período de maior índice pluviométrico, observou-se a distribuição da quantidade de ocorrências mês a mês (Figura 36), para posterior comparação com a pluviometria. Ficou evidente que o primeiro e o último trimestre do ano foram os períodos mais críticos em termos de ocorrências, com maior número de registros desses casos.

(a) Distribuição de ocorrências de geometria da via por mês



(b) Distribuição de ocorrências na plataforma por mês

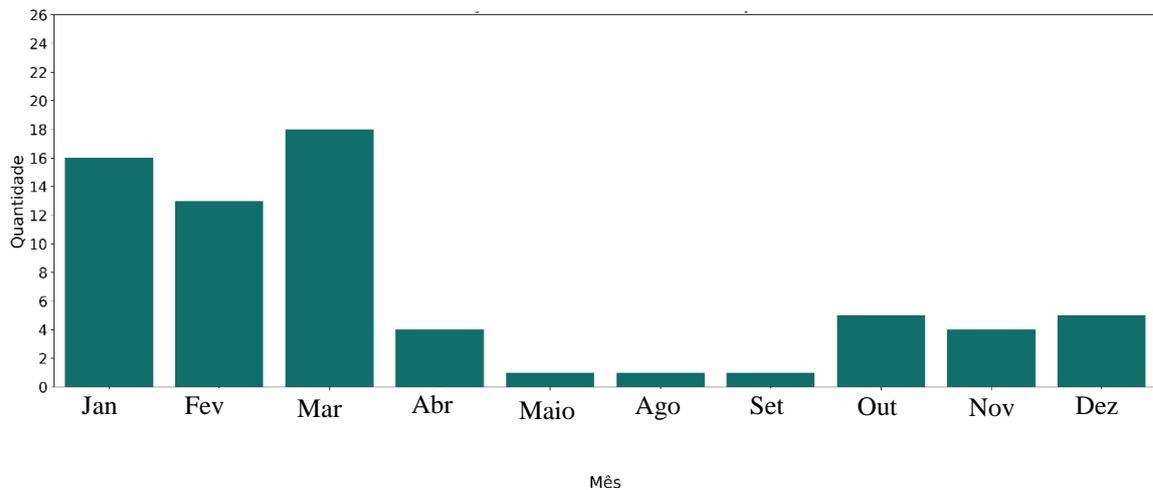


Figura 36 – (a) Gráfico de barras da distribuição de ocorrências de geometria na via ao longo de 2020 por mês, e (b) gráfico de distribuição de anomalias registradas na plataforma ao longo de 2020 por mês

De acordo com os resultados obtidos, dentre os anos de 2020 e 2021, dos pluviômetros instalados ao longo da EFVM (Figura 37), pode-se constatar que a distribuição dos desvios geométricos e eventos nesta plataforma são mais frequentes no período de maior média mensal na região entre Belo Horizonte e Vitória (Figura 38). Essa possível analogia será pontualmente analisada para um estudo em um segmento específico para se verificar a hipótese da existência de correlação.

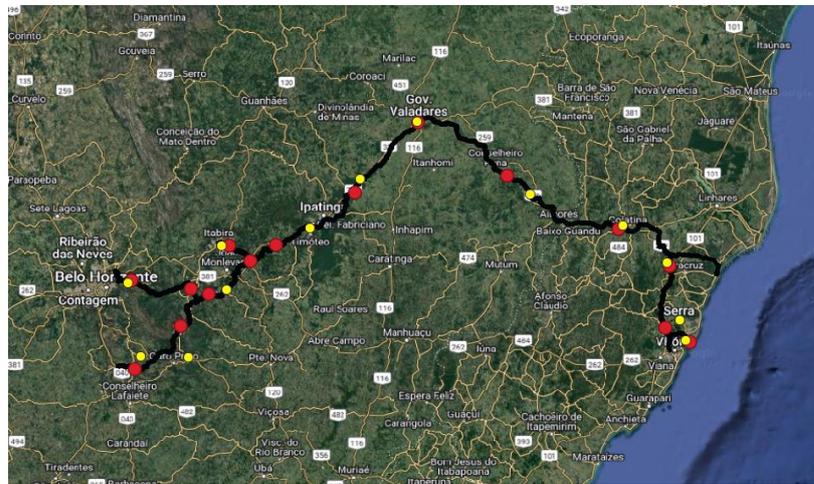


Figura 37 – Mapa de localização dos pluviômetros instalados ao longo da EFVM pela VALE em vermelho e pelo Cemaden em amarelo

Fonte: Fernando Cossetin

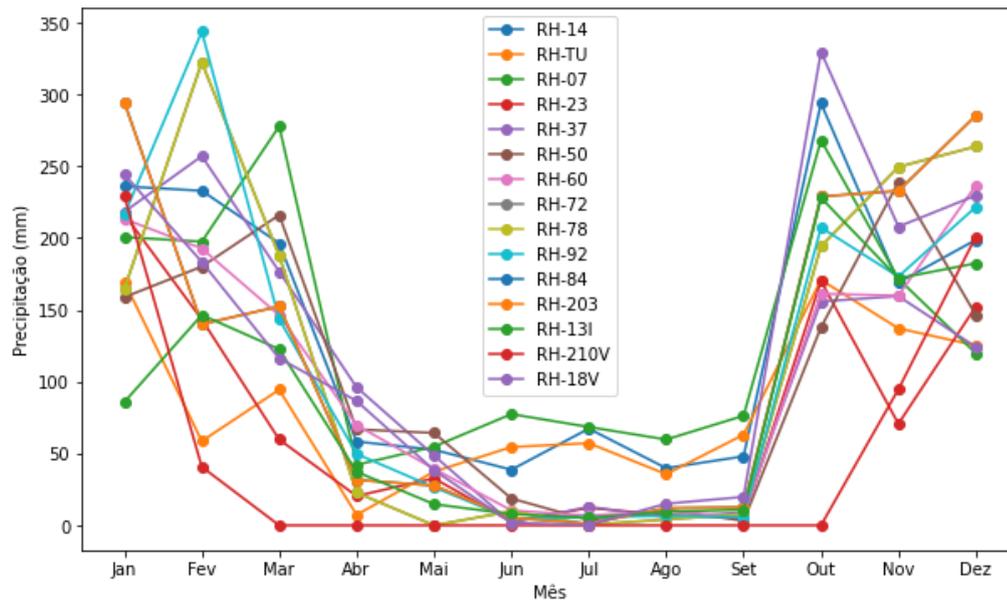


Figura 38 – Gráfico em linha da média mensal de precipitação entre 2020 e 2021 dos pluviômetros do Cemaden

Fonte: Fernando Cossetin

Seguindo o procedimento predeterminado na metodologia, é necessário identificar-se qual o trecho apresenta um estado mais degradado. O intuito é viabilizarem-se mais pontos de comparação entre os diferentes equipamentos em situações críticas, ou seja, onde houve a identificação de uma ocorrência na via férrea.

A forma como o *dataset* de ocorrências é estruturado envolve a atribuição de cada um de seus registros de ocorrência aos elementos correspondentes na via. Esses elementos são identificados de acordo com uma nomenclatura específica que os divide em categorias, como curva, tangente e rh. Já a nomenclatura utilizada segue um critério que visa facilitar a localização rápida dos elementos na EFVM, conforme a seguinte lógica: *EH + Linha + elemento + nº de identificação crescente*. Para ilustrar essa identificação, pode-se traduzir o exemplo a seguir: "70/71 L1 curva 1" refere-se à primeira curva da linha 1 da EH 70-71 da EFVM. Isto posto, obteve-se a representação gráfica apresentada pela Figura 39, onde se destacou o elemento pertencente a EH 67-68.

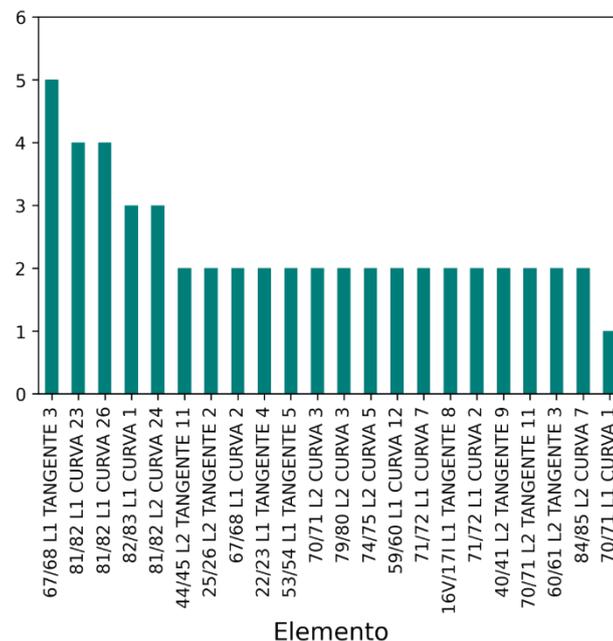


Figura 39 – Recorte do gráfico em barras para os elementos da via com maior quantidade de anomalias constatadas no ano

Por conseguinte, um segmento nomeado como “Trecho 1” de extensão de 10 km foi selecionado (km 442 a km 452), seguindo-se a premissa de se contemplar toda a extensão da EH 67-68, para ser estudado de maneira mais aprofundada (Figura 40 e Figura 41). O objetivo foi identificarem-se possíveis padrões e correlações que eventualmente pudessem ser utilizados em outros trechos da ferrovia. Além disso, o trabalho com dados de um segmento específico também auxiliaria na manipulação dos dados nas simulações realizadas, já que diminuiria significativamente a memória de processamento necessária.

Escolha do trecho:

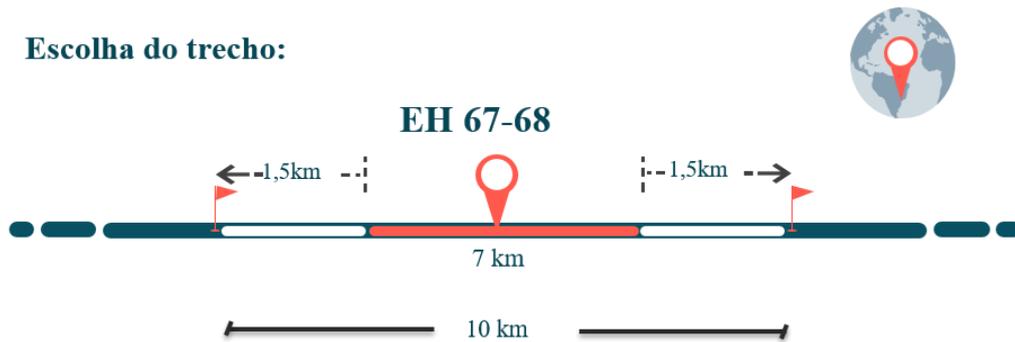


Figura 40 - Esquema ilustrativo da estratégia de definição e escolha do trecho para o estudo de caso

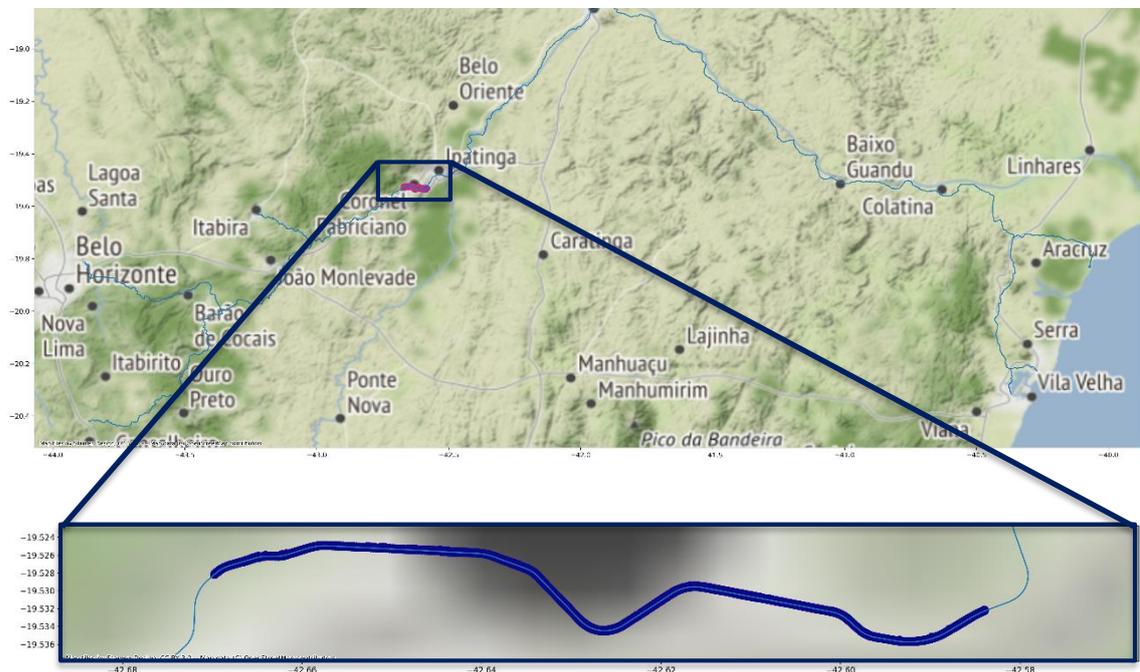


Figura 41 - Mapa de georreferenciamento do Trecho 1 em estudo

Como no Trecho 1 foi constatada uma frequência maior de anomalias no período de análise, quando comparado com outros segmentos, sua realizou-se sua avaliação conforme consta na Figura 42. É interessante observar que houve maior incidência de eventos nos primeiros meses do ano neste segmento, sendo todos relacionados à geometria da via, além de reincidência de ocorrências nos elementos Tangente 3 e Curva 2.

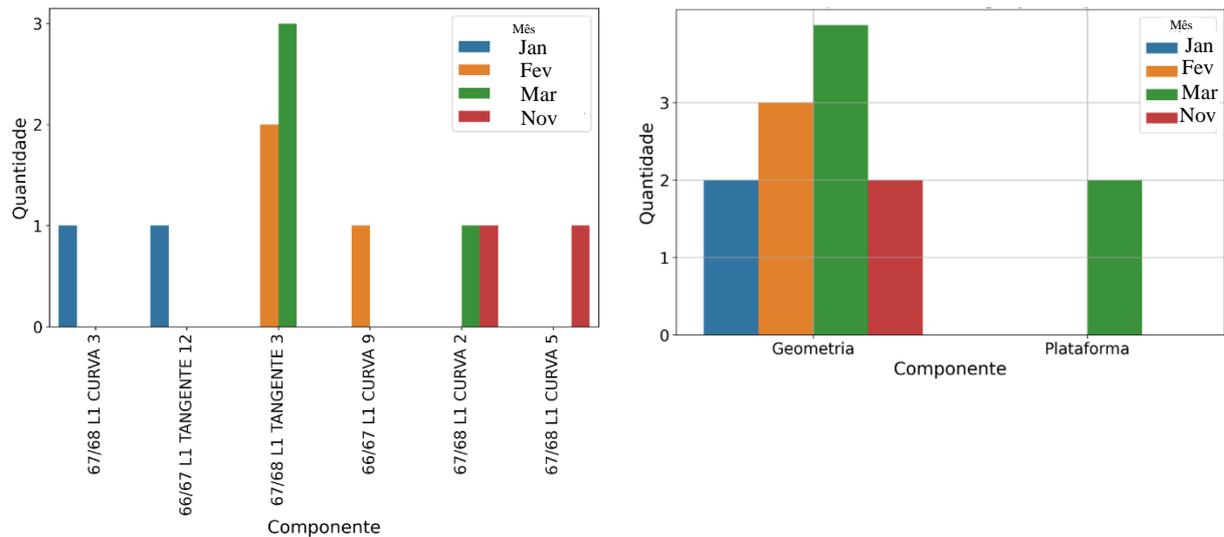


Figura 42 – Distribuição de ocorrências por mês no Trecho 1 no período de análise

Dentre as anomalias, destacam-se onze registros de problemas de geometria na via, sendo seis desnivelamentos longitudinais e cinco transversais. Esses problemas foram identificados no primeiro trimestre do ano, e somente em novembro outros dois eventos foram observados, mas avaliados como recalque da plataforma, conforme descrito na Tabela 6.

Tabela 6 – Tabela descritiva para as anomalias identificadas ao longo de 2020 para o Trecho 1

Tipo de anomalia	Quantidade	Especificação	Quantidade
Geometria	11	Desnivelamento longitudinal	6
		Desnivelamento transversal	5
Plataforma	2	Recalque	2

A caracterização do Trecho 1 teve o propósito de identificar comportamentos médios ou discrepantes, além de revelar tendências, comparando-os e permitindo a investigação da interdependência entre variáveis, em diferentes instantes de tempo. Assim, foram selecionadas três viagens ao longo de 2020, sendo uma em março (viagem 1), outra em junho (viagem 7) e a última sendo em agosto (viagem 11). Conseqüentemente, a partir dos dados selecionados dessas viagens, foi elaborado um estudo avaliativo, iniciando com análises descritivas através de gráficos de histograma vertical dos principais atributos do VI, onde a largura das barras corresponderia à amplitude do intervalo e a altura seria proporcional à frequência (ou ao percentual). De maneira geral, conforme Figura 43, o comportamento dos dados da viagem 1

para aceleração (a), *Suspention Travel* (b), *BodyRock* (c) e *Bounce* (d) não aparentou ter uma distribuição aproximadamente normal, mas sim dois grupos sem simetria, sendo um deslocado a direita e outro a esquerda. Pelo gráfico, ainda foi possível determinar que todos são bimodais com pequenos conjuntos de *outliers*, a exceção é apenas para Velocidade (e) que não apresentou um comportamento bem distribuído contendo dados agrupados em diferentes intensidades. Essa avaliação é importante para se definir as ferramentas estatísticas a serem utilizadas durante as análises. Acredita-se que esse comportamento foi constatado devido à amostra pequena de viagens disponibilizadas, já que para outros trabalhos como Barbosa (2011), Lasisi (2016), Santos *et al.* (2017), Soleimanmeigouni (2019) e Yeo (2017), os dados provenientes das inspeções apresentaram comportamento considerado aproximadamente normal.

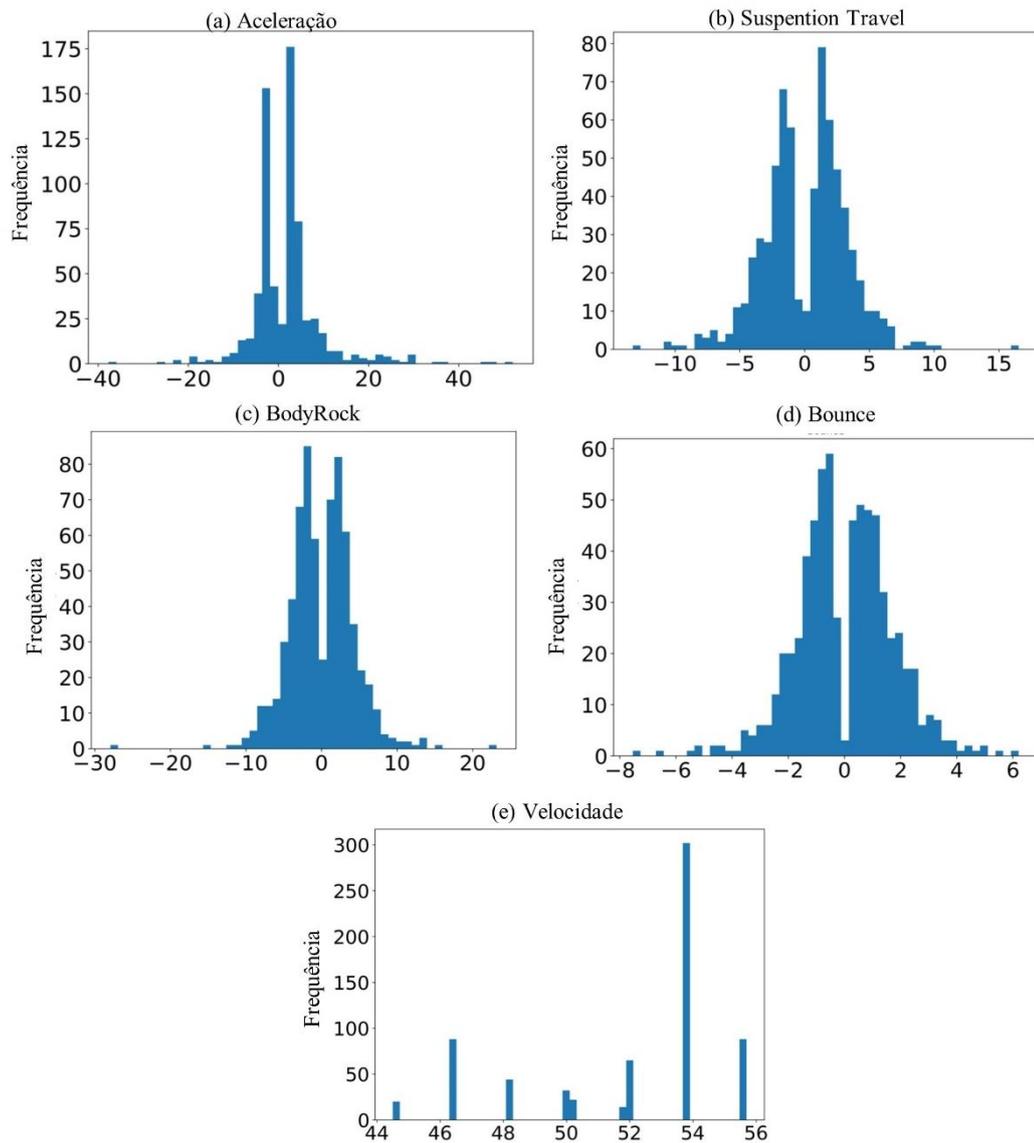


Figura 43 – Histogramas para os parâmetros Aceleração (a), *Suspention Travel* (b), *BodyRock* (c), *Bounce* (d) e Velocidade (e) da viagem 1 do VI

Optou-se em visualizar a distribuição dos parâmetros fazendo uso de ferramenta exploratória de análise de dados em gráficos *boxplot*. Por meio dele, sintetizam-se diversas informações relativas à distribuição para os quatro atributos representada na Figura 44. Como a velocidade apresenta um intervalo de valores bem distinto quando comparado com os demais, optou-se em realizar essa visualização de forma separada.

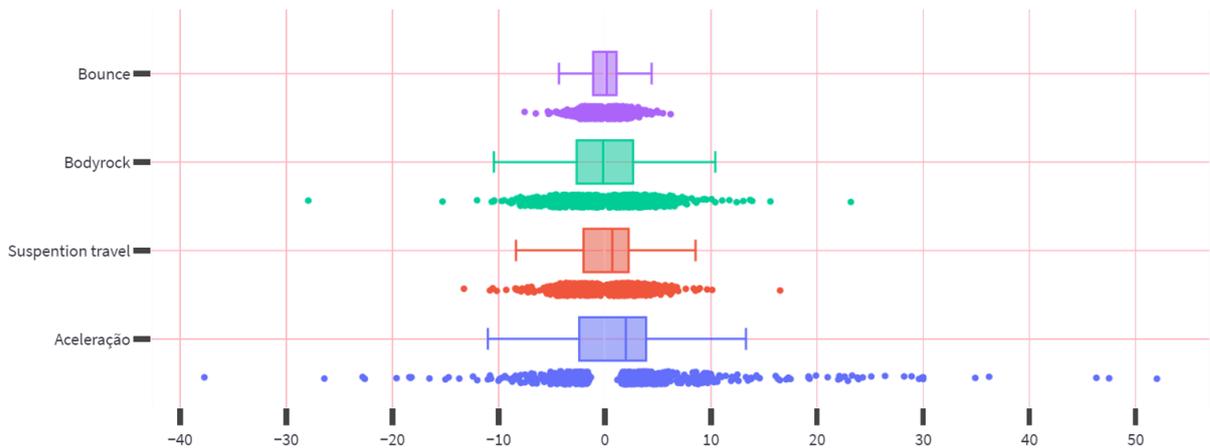


Figura 44 – *Boxplot* e pontos de distribuição dos registros para os parâmetros *Bounce*, *BodyRock*, *Suspention Travel* e *Aceleração* da viagem 1 do VI

Conforme a Figura 44, fica perceptível a amplitude dos diferentes atributos e alguns valores discrepantes. Para a fase inicial do estudo não foi viável retirar os *outliers*, já que eram potenciais valores que corroborariam a identificação de possíveis anomalias na dinâmica do vagão e que poderiam estar associadas a uma irregularidade geométrica na via. Portanto, para cada caso em que foram constatados dados discrepantes, foram realizadas verificações para identificar se um dado valor seria válido para o estudo ou um ruído.

No caso da velocidade no *boxplot* (Figura 45), não houve variações na frequência de distribuição dos dados, mas sim agrupamentos bem visíveis na distribuição dos pontos, em grupos de velocidade em torno de 44; 46; 48; 50; 52; 53; 55 km/h, mudando apenas nas casas decimais. A velocidade interfere na magnitude dos valores para os demais parâmetros e, desta forma, será avaliada sempre em conjunto com os outros atributos e não de forma separada.

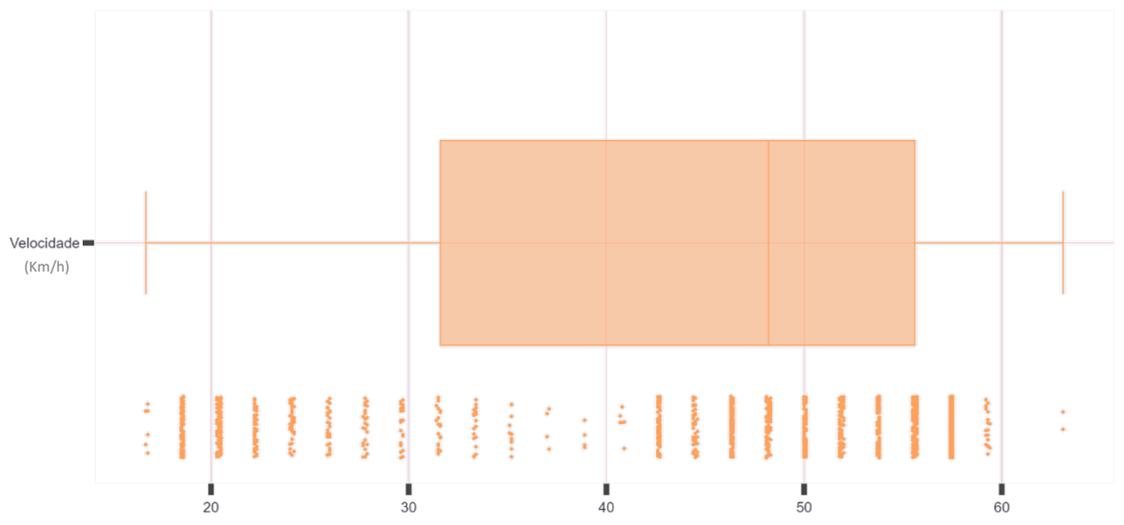


Figura 45 – *Boxplot* e pontos de distribuição dos registros para o parâmetro Velocidade da viagem 1 do VI no Trecho 1

As variáveis em questão representam movimentações distintas do vagão que, por possuir graus de liberdade, permite a agitação natural que varia de acordo com as excitações que o corpo recebe do meio, como velocidade da composição imposta pelo maquinista, raio de curvatura e condições da via.

A tendência geral dos principais parâmetros foi uma média em torno de zero, o que se justifica por conta da variabilidade dos valores, podendo ser negativos ou positivos (a diferença de sinal apenas indica o direcionamento do movimento de acordo com o eixo de referência no vagão). Os veículos que trafegam na via férrea possuem um movimento harmônico natural, e essa oscilação, tende a possuir um padrão característico devido às particularidades da via férrea (como, por exemplo, diferentes materiais, tipo de traçado, raio, grau de superelevação e suporte da via).

Outra situação que está diretamente relacionada ao comportamento desses atributos é a presença de anomalias na via. Espera-se que um trecho com maior degradação apresente parâmetros com maior intensidade, quando comparado com outro recém renovado. Porém, para conseguir caracterizar o comportamento padrão do vagão com melhor precisão neste trecho seria preciso avaliar outras viagens do VI. Quanto maior esse banco de dados com histórico dos registros do segmento, melhor seria a caracterização para o trecho.

Após ver como se comporta cada variável numérica, foram verificadas as possíveis relações, se fortes, nulas ou fracas, entres os principais parâmetros do VI. Por conseguinte, realizou-se um

gráfico em mapa de calor (Figura 46) onde observou-se que a relação mais forte é a correlação entre *Suspension Travel* com *BodyRock* (0,56) e *Suspension Travel* com *Bounce* (0,55). Para os demais, não foram contatadas correlações. Outros trabalhos como Barbosa (2011), Lasisi (2016), Santos *et al.* (2017), Soleimanmeigouni (2019) e Yeo (2017) avaliando dados da condição da via, os consideraram como estando em uma distribuição normal em seus estudos. Portanto, foi adotada a mesma consideração fazendo o uso da correlação de Pearson para as análises de dados.

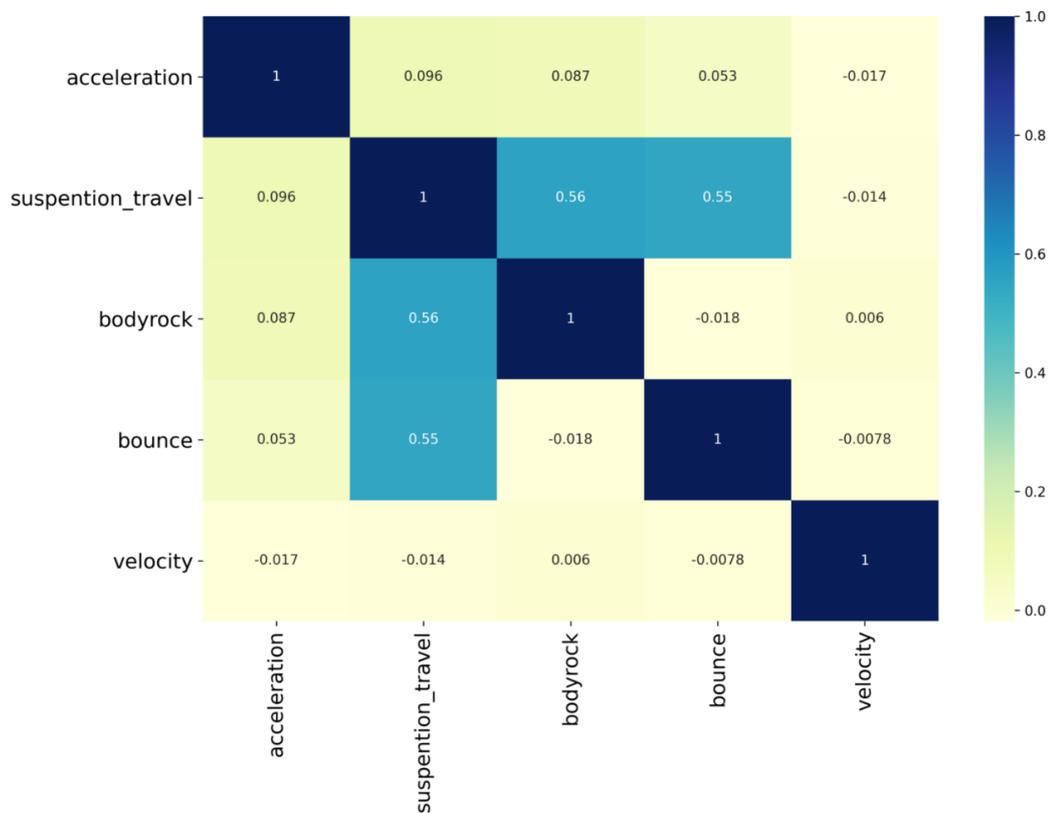


Figura 46 – Mapa de calor da correlação de Pearson para os atributos principais do VI para a viagem 1 no Trecho 1

Esse estudo estatístico também foi realizado para as demais viagens selecionadas para o Trecho 1 e estão presentes no Apêndice B deste trabalho. Observa-se que mesmo não apresentando um comportamento normalmente distribuído, a correlação de Pearson pode ser utilizada para os dados provenientes da oscilação dinâmica do vagão, já que alguns atributos possuem relações lineares mais fortes, do que comparado com as relações monotônicas.

Com a finalidade de resumir as diferenças encontradas na sumarização estatística das viagens do trecho, foi realizado o gráfico comparativo das principais medidas descritivas (Figura 47). Quando comparados os registros da dinâmica do vagão para instantes distintos no ano de 2020,

houve uma mudança notável no desvio padrão na viagem 11 com relação às demais. Observa-se que há uma variação perceptível para os atributos do VI ao longo do tempo. Tal fator, representa uma tendência de aumento gradual nos parâmetros medidos neste trecho, quando analisadas as medidas descritivas para a viagem mais recente de março (viagem 1) e mais para no final do ano no mês de agosto (viagem 11).

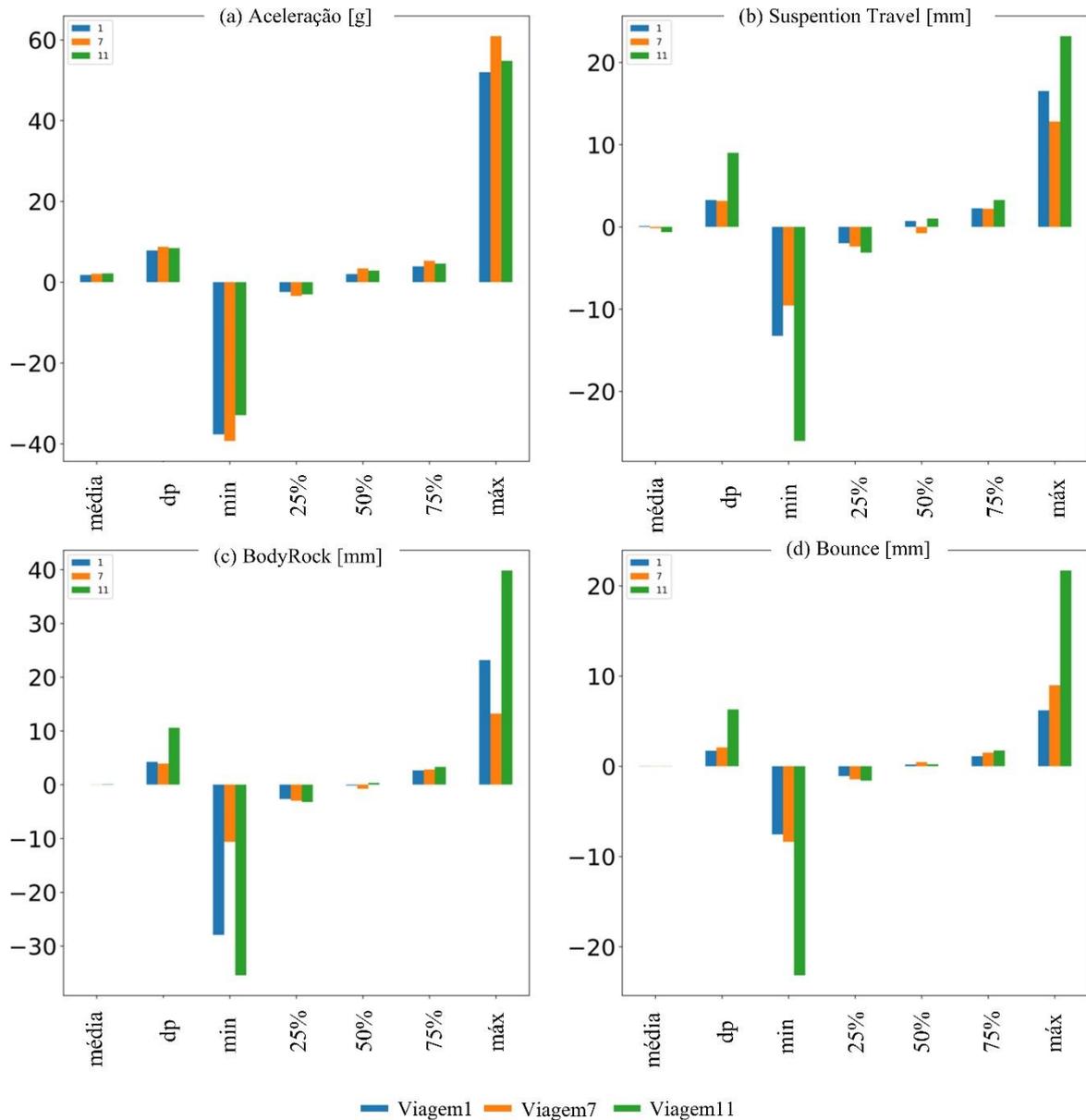


Figura 47 – Medidas descritivas das viagens 1, 7 e 11 do Trecho 1 para os parâmetros Aceleração, *Suspention Travel*, *BodyRock* e *Bounce*.

A aceleração foi a variável que não demonstrou alterações abruptas visíveis, porém avaliando-se as demais, observaram-se “saltos”, destacando-se principalmente quando há a análise do desvio padrão das viagens. Nota-se também a tendência linear de aumento, em módulo, do

primeiro quartil e terceiro quartil para esses parâmetros das viagens. Essa variação presente no desvio padrão das viagens pode ser justificada pelo aumento dos *outliers* presentes em cada amostra, conforme o passar do tempo. Sendo assim, um estudo para investigar as causas do comportamento desses conjuntos específicos de dados foi realizado. É importante salientar que a funcionalidade do VI, como equipamento para auxiliar a equipe de manutenção, consiste na relação da capacidade de identificar pontos da via férrea em que a oscilação dinâmica está com intensidade maior que o considerado como “padrão”. Há a possibilidade desses registros evidenciarem um grau de severidade mais elevado caracterizando um comportamento predecessor a um evento que gere uma manutenção corretiva. Deste modo, com o intuito de identificar esses possíveis conjuntos de dados que intensificaram as medidas descritivas das viagens, foram desenvolvidos gráficos de distribuição dos registros ao longo do trecho de 10km de cada viagem, com o auxílio da ferramenta Tableau e *DataMap*, visualizando-se cada um dos atributos principais do VI. Também para essa etapa utilizou-se variação interquartil (IQR) para eliminação de outliers da matriz de entrada. É fundamental frisar que alguns pontos, principalmente para as viagens de março e junho, estão sobrepostos, gerando lacunas aparentes de dados quando plotados ao longo do trecho (Figura 48). Isso ocorre devido às limitações provenientes de problemas de georreferenciamento, havendo necessidade de melhor precisão. Conforme demonstrado pela Figura 48, a viagem com melhor qualidade de informações foi a “viagem 11” realizada em agosto de 2020.

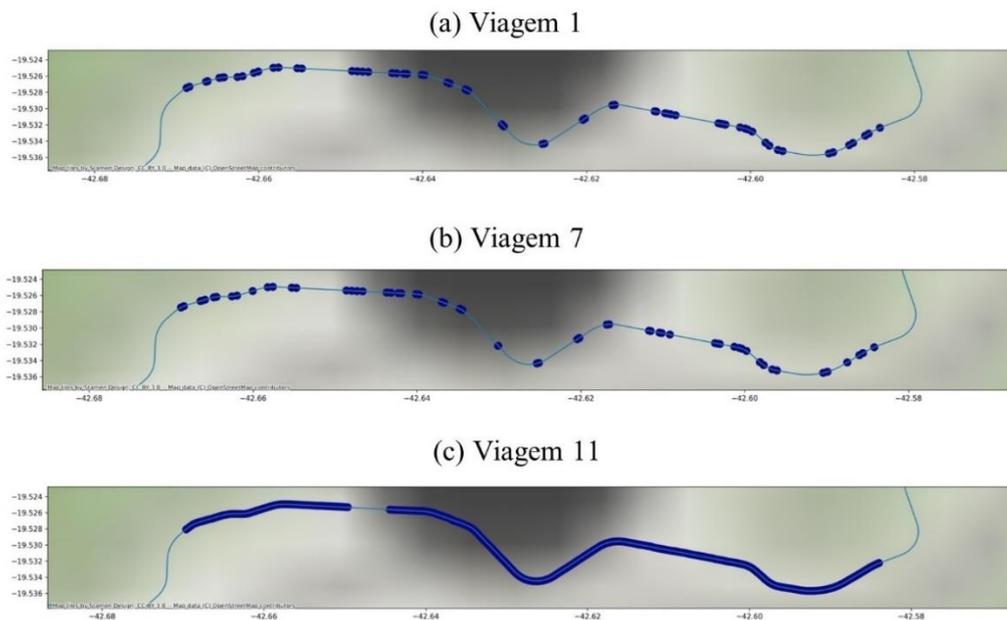


Figura 48 – Mapa da distribuição dos registros georreferenciados do VI para a viagem 1 (a), viagem 7 (b) e viagem 11 (c) ao longo do Trecho 1.

Experimentalmente, foram selecionados segmentos menores, mais especificamente os elementos que compõem o Trecho 1, devido à grande incidência de registros discrepantes. Estes foram filtrados e escolhidos para validação comparativa com os levantamentos realizados pelo CC para o mesmo trecho.

Nos 10 km separam-se dois elementos, identificados pela administração ferroviária por nomenclatura interna como Curva 2 (com 633 m de extensão) e Curva 5 (com 265 m de extensão). Constatou-se para o elemento Curva 2 do Trecho 1, que os registros estavam localizados a mais ou menos um desvio padrão com relação à média desta amostra (Figura 49). Os valores de desvio padrão calculados apenas para esse elemento, levando em consideração os dados das três viagens são: 8,52 para aceleração; 4,19 para *BodyRock*; 1,83 para *Bounce*; e 3,00 para *Suspention Travel*.

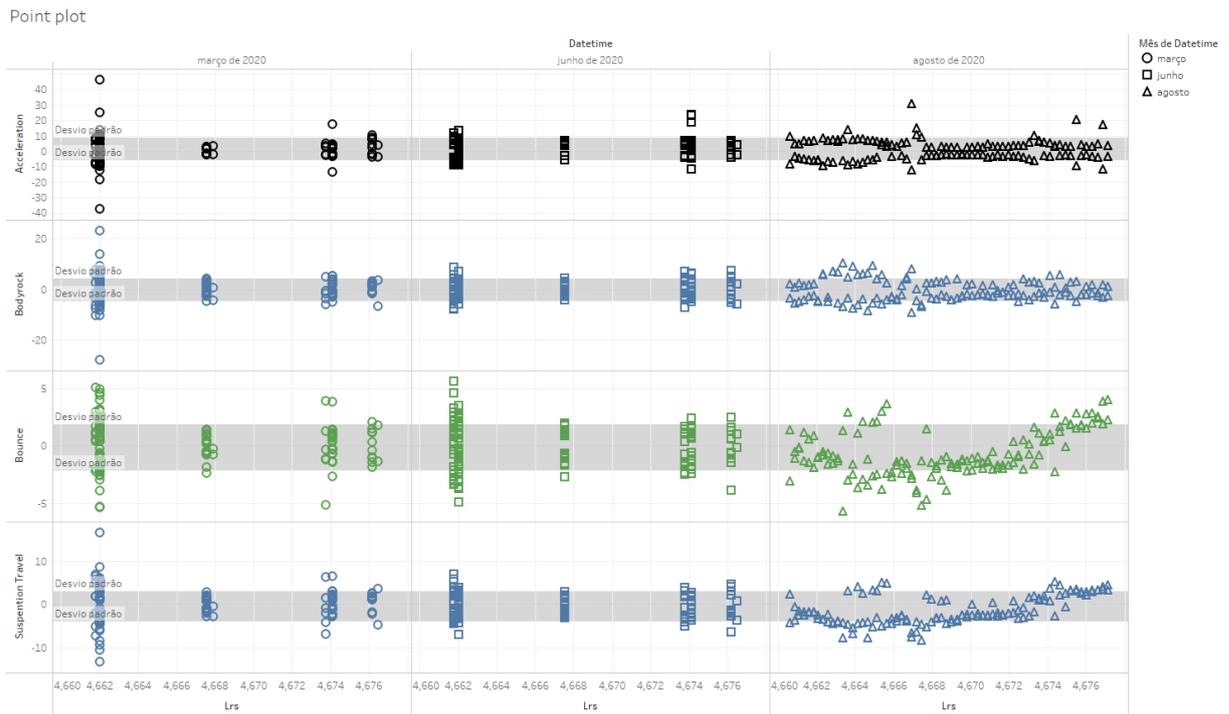


Figura 49 – Dispersão de pontos para o elemento Curva 2 localizado dentro do Trecho 1 em LRS para as viagens 1,7 e 11.

Para o levantamento realizado em março (viagem 1), há conjuntos de pontos que destoam dos demais para todos os atributos do VI. Destacam-se registros de *Bounce* e *Suspention Travel* que atestam as análises de correlações entre eles realizada anteriormente. Os pontos acima ou abaixo de um desvio padrão podem representar um distúrbio na geometria da via. Por outro lado, dados muito acima de um desvio padrão, poderiam ser ruídos neste caso com o VI. Portanto, para confirmar essa hipótese inicial, seriam necessários estudos comparativos com outros equipamentos ou por inspeção visual no local.

Verificando-se os registros para a viagem do mês de junho, os dados apresentaram um comportamento com menor variabilidade na distribuição, sendo o destaque maior quanto ao atributo *Bounce*, com alguns pontos ainda acima e abaixo de um desvio padrão. Já para a viagem 11, em agosto, além de visualmente ser perceptível a melhora na distribuição dos dados pelo ajuste na precisão do georreferenciamento, houve uma tendência do mesmo comportamento do levantamento anterior, com registros muito próximos do limite do intervalo.

Com relação ao elemento Curva 5, os dados foram plotados ao longo de sua extensão (Figura 50), sendo ainda mais notória a presença de pontos com desvios elevados em comparativo com a Curva 2 anteriormente analisada.

Os valores para desvio padrão calculados apenas para esse elemento, levando em consideração os dados das três viagens foram 10,56 para aceleração; 8,65 para *BodyRock*; 5,15 para *Bounce*; e 6,86 para *Suspention Travel*. Como a Curva 5 possui raio de 560 m com grau 2°02', enquanto a Curva 2 dispõe de raio de 380 m com grau 3°01', é factível quem ambas não tenham desvios semelhantes, uma vez que a mudança das características de cada curva poderia justificar essa diferença. Assim, para uma gestão propondo-se a otimização da vida útil dos ativos, tal fator evidencia que a qualidade da via deve ser analisada visando as propriedades específicas de cada seção.

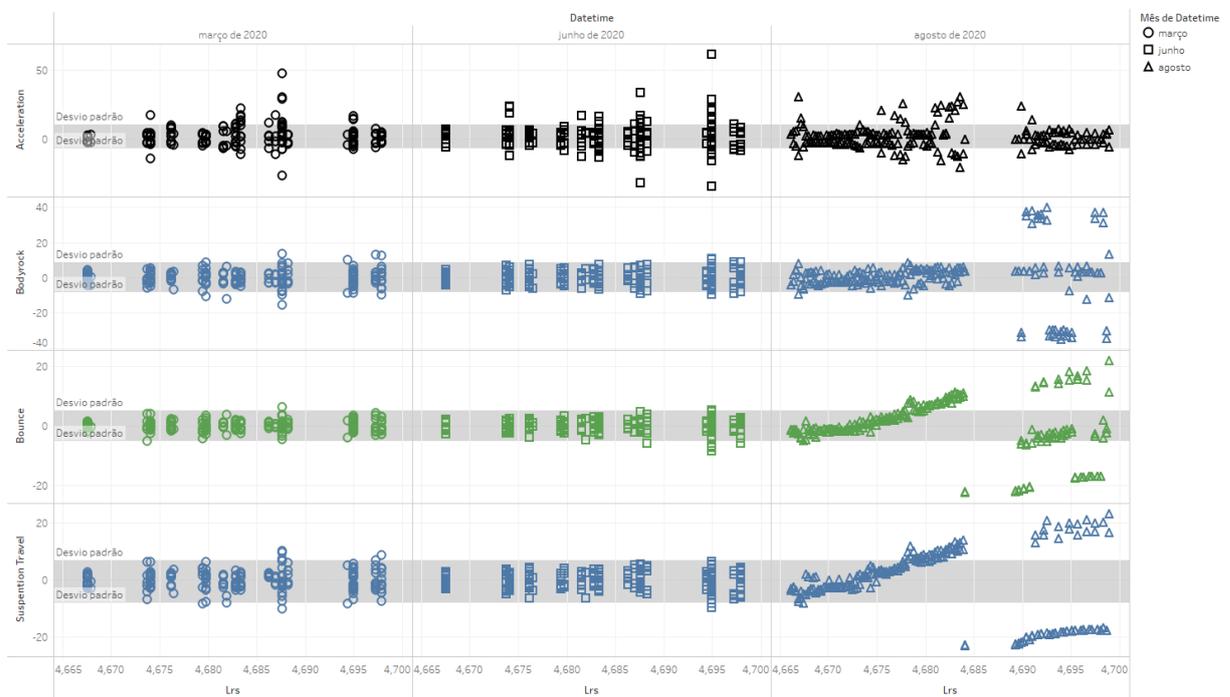


Figura 50 – Dispersão dos pontos ao longo da extensão do elemento Curva 5 do Trecho 1 em LRS para as viagens 1, 7 e 11.

Na viagem de março (viagem 1) identificaram-se poucos pontos fora da faixa de distribuição de mais ou menos um desvio padrão. Os atributos que mais apresentaram registros com esse comportamento foram a aceleração, seguida por *Suspention Travel* e *BodyRock*, sendo todos na mesma faixa de extensão do segmento. Essa movimentação não condiz com as correlações mais intensas apuradas nas análises preliminares, porém, valores de aceleração mais elevados podem indicar regiões em que há maior impacto das rodas do vagão com o trilho, ou pontos onde há alteração de rigidez, o que pode ser o caso de apenas uma casualidade de todos apresentarem variação nesse trecho.

Quando a viagem 1 foi comparada com a viagem 7, pode-se dizer que houve evolução na dispersão dos dados no caso do atributo aceleração, além de ter sido observado que registros que estavam contidos no mesmo intervalo de segmento na viagem anterior tiveram aumento nos valores máximos e mínimos. Para os demais atributos, não foi constatado esse mesmo comportamento e os dados ficaram concentrados próximo à média do elemento.

Com a melhora na distribuição dos dados ao longo do elemento (na viagem 11), ficou perceptível para os atributos *Bounce* e *Suspension Travel* a tendência linear de evolução dos valores a partir da LRS 4,677, com uma intensa semelhança de comportamento. Tal conduta dos dados era esperada devido à correlação mais forte entre os atributos (de 0,58). Também se observou que no segmento em que foram obtidos os valores máximos de *Suspension Travel*, foram registrados os maiores valores de *Bounce*, o que pode ser justificado pela relação proporcional de intensidade de aproximadamente de 0,29. Já a aceleração, esta manteve a proporção de dados destoantes do mês anterior.

A mesma apreciação foi feita com os dados do CC. Neste caso, foi importante utilizá-lo como etapa de validação das possíveis inferências sobre as correlações e características específicas da movimentação do vagão. Para tal, dispunha-se de 5 viagens realizadas em 2020, distribuídas ao longo dos 10 km (Figura 51). O levantamento feito variou conforme a ocupação da linha no momento da inspeção, mas sempre com a premissa de cobrir toda a via em ao menos 6 inspeções anuais.

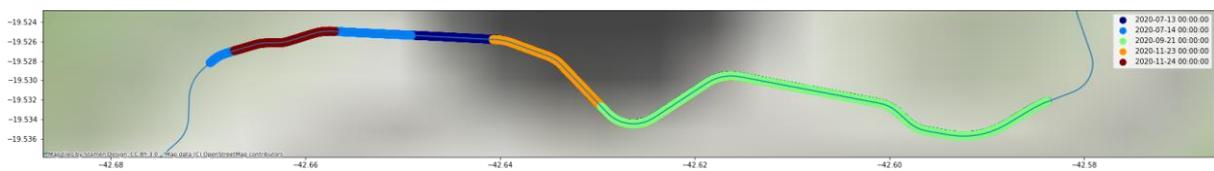


Figura 51 – Distribuição das viagens realizadas pelo CC para o Trecho 1 ao longo de 2020.

Conforme comentado anteriormente, a metodologia atualmente em vigor no Brasil regula apenas a avaliação individual dos parâmetros geométricos, no entanto, na literatura internacional existem outras técnicas amplamente empregadas em ferrovias ao redor do mundo. Inicialmente, optou-se por avaliar o Trecho 1 através da combinação dos desvios padrão dos parâmetros geométricos pelo CoSD, bem como seus desvios individuais (SD). Ambas as metodologias estão descritas nas normativas EN 13848-6 (2014) e EN 13848-5 (2008) e serviriam nesta pesquisa em etapas complementares para validar e investigar possíveis

correlações. O CoSD, que é um índice global de qualidade da via, foi aplicado na ferrovia na condição de bitola métrica, dividindo-a em blocos de 200 m, o que resultou no gráfico apresentado na Figura 52.

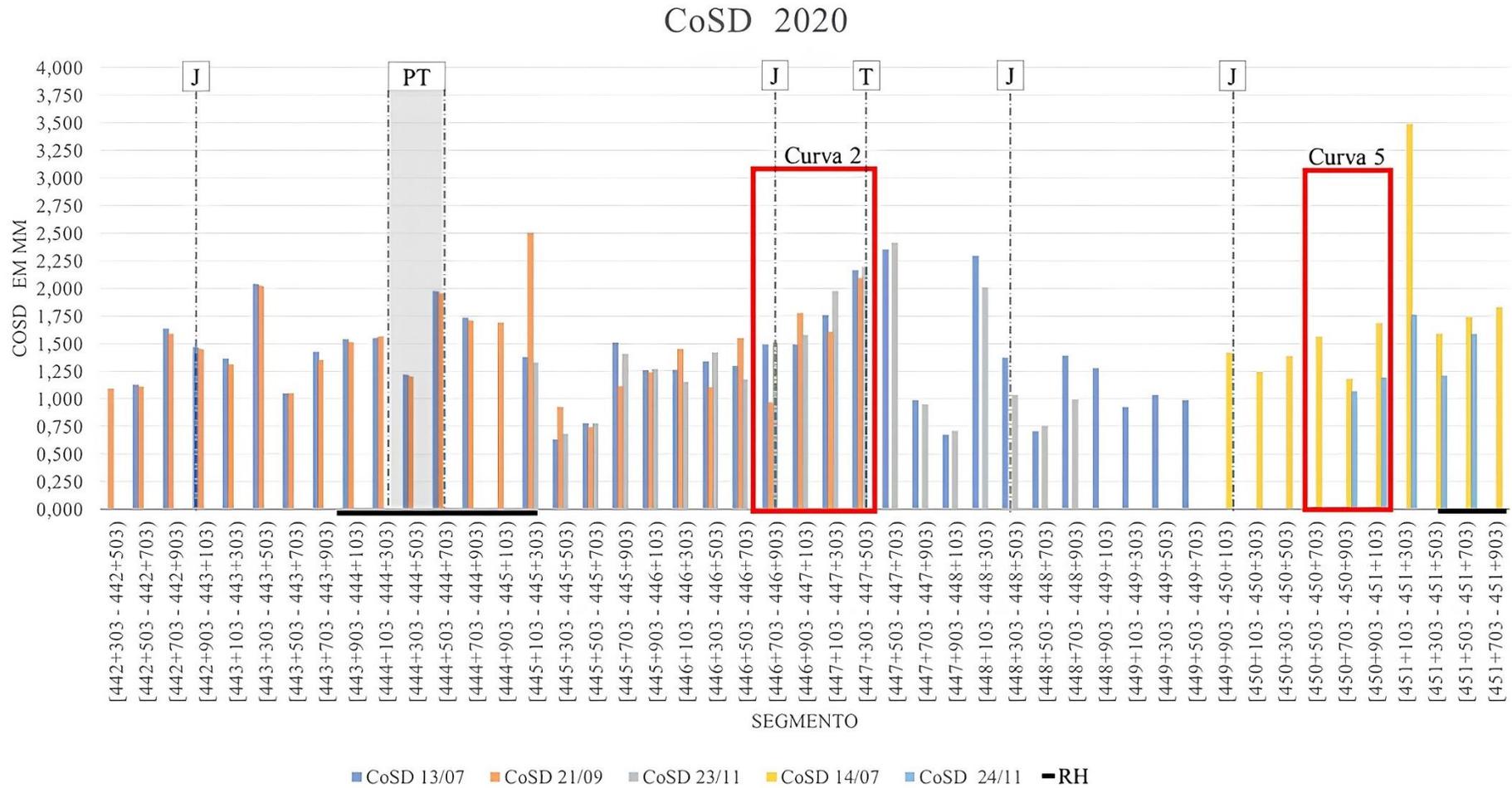


Figura 52 – Gráfico do índice de qualidade CoSD segundo o método (EN 13848-6,2016), em milímetros. Onde J (junta isolada colada), PT (ponte), T (travador).

É importante salientar que, para o método descrito na norma EN 138488-6 (2016), foram adotados valores de ponderação (w_i) iguais a 0,25 para todos os parâmetros de geometria, incluindo alinhamento, bitola, alinhamento transversal e nivelamento longitudinal. Vale ressaltar que a escolha desses valores de ponderação está diretamente relacionada à decisão do especialista ferroviário, no entanto, para este estudo, optou-se por adotar o mesmo valor utilizado no trabalho de Offenbacher et al. (2020). Entretanto, ao aplicar o método em todo o trecho, foi possível observar a existência de blocos com combinações de parâmetros elevados. Conforme mencionado anteriormente, quanto maior o valor do desvio, pior é a condição da via. A análise dos dados do gráfico revelou uma variação natural nos valores do CoSD para cada viagem realizada no trecho. Esse fator está presente em cada viagem do CC, e como é a base para o cálculo do método, ele se fez evidente no gráfico. Essa variação ocorreu devido a pequenos erros de leitura dos sensores do CC e às mudanças nos parâmetros geométricos durante a inspeção, especialmente em circunstâncias como chuvas intensas ou durante trabalhos de manutenção. Portanto, eram esperadas pequenas diferenças nos parâmetros em cada inspeção.

Embora este método seja relativamente simples de se utilizar, a divisão em blocos de 200 m sem levar em consideração as características do elemento, como curvas ou tangentes e a rigidez da via, pode resultar em valores que não refletem com precisão as condições reais no local. O ideal seria agrupar esses registros em blocos homogêneos, com propriedades semelhantes, porém, essa abordagem não é viável para a automatização dos cálculos, já que imprime uma variação muito grande e demandaria o emprego elevado de recursos.

A variação nos valores do desvio padrão combinado para cada bloco também pôde ser atribuída à presença de elementos especiais na linha. As regiões de aparelhos de mudança de via, juntas nos trilhos e zonas de transição são naturalmente áreas sujeitas a um maior impacto do material rodante por possuírem características distintas. Isso faz com que as leituras do CoSD registrem dados com comportamentos (desvio padrão, média e variância) diferentes em comparação com trechos de linha corrida, por exemplo.

Os pontos que exigem maior atenção por parte das equipes de manutenção da via férrea estão consistentemente associados aos locais onde é observado um índice mais elevado. Neste caso específico, os elementos que constituíam os blocos de 200 m, identificados pelo método como os mais degradados, incluem a Curva 2, a Curva 3, a Tangente 3 e a Curva 6, que fazem parte

da EH67-68, bem como a Curva 9, que pertence à EH66-67. Todos esses blocos apresentaram valores próximos de 2 mm de CoSD.

A média do CoSD para a Curva 2 foi de 1,51 (em 13/07), 1,48 (em 21/09) e 1,56 (em 23/11). Já para a Curva 5, os valores médios do CoSD foram de 1,13 (em 24/11) e 1,48 (em 14/07). No entanto, é importante destacar uma peculiaridade neste caso. Ao avaliar a diferença entre as viagens nessa Curva 5, há um bloco a menos (200 m) em comparação com as outras curvas, portanto, a apresentação de um desvio superior poderia ser estatisticamente compreensível.

É importante notar que este método pode não ser representativo ao avaliar elementos de dimensões pequenas, portanto, optou-se por também analisar os parâmetros individualmente usando o método SD. Os desvios dos parâmetros geométricos foram calculados no Trecho 1 e estão apresentados no Apêndice C. Como exemplo, a Figura 53 mostra o alinhamento como ilustração desse processo.

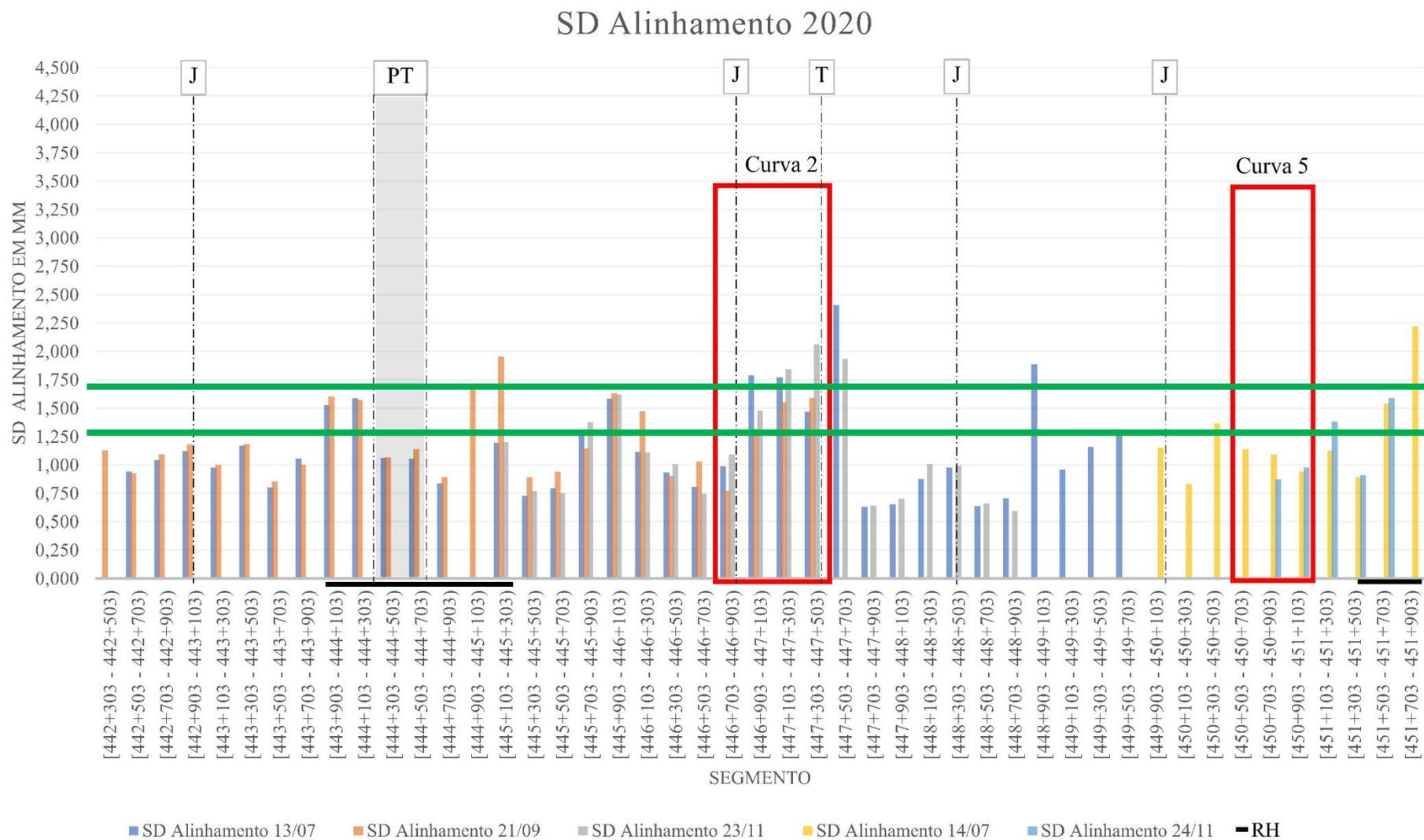


Figura 53 – Desvio padrão do alinhamento segundo o método EN 13848(2008), em milímetros. Onde J (junta isolada colada), PT (ponte), T (travador) e em verde a linha da referência para o limite para atenção definido pela própria normativa europeia

Para o segmento de 10 km calculou-se o desvio padrão para alinhamento, resultando nas seguintes observações:

- Alguns blocos apresentaram valores notavelmente maiores em comparação aos demais. Na maioria dos casos, isso ocorreu em áreas coincidentes com as regiões onde estão localizadas as juntas de trilho, aparelhos de mudança de via e zona de transição (especialmente em saída da ponte). Em trechos de via com dormente de concreto, os desvios desse parâmetro são minimizados, como evidenciado no gráfico;
- Em geral, as regiões com valores mais elevados tendem a ser aquelas que incluem grandes extensões de curva nesse agrupamento. Essa ocorrência pode ser justificada pelo maior esforço exercido sobre o trilho externo à curva;
- Para o parâmetro de alinhamento, a normativa estabelece um intervalo limite. Foi identificado pelos cálculos que os elementos como a Curva 2, Tangente 3, RH 68 e RH 67 se mostraram muito próximos desse intervalo limite (no limite inferior). Portanto, esses pontos requerem uma atenção especial para uma avaliação mais detalhada;
- Utilizando esse método, foram identificados pontos adicionais que exigiriam atenção, pois apresentam desvios próximos ou superiores aos limites recomendados pela normativa (EN 13848-5) para velocidades inferiores a 80 km/h. Os elementos que compõem esses blocos são a Curva 2 e a Curva 3.

No relatório de ocorrências de 2020 não foram identificadas informações adicionais sobre ações corretivas específicas para o período estudado que pudessem justificar as variações abruptas observadas em cada inspeção.

Sendo avaliados especialmente os dados das Curvas 2 e 5, conforme seleção em vermelho na Figura 85, embora os valores não tenham ultrapassado o limite recomendado, notou-se que a Curva 2 apresentou uma degradação maior em comparação com a Curva 5. Além disso, observou-se um aumento no desvio na última viagem, situação condizente com o VI. Como parte da investigação, também se optou em calcular os demais parâmetros e os resultados são apresentados no Apêndice C.

Como etapa final, utilizando os registros do CC realizou-se uma avaliação em conformidade com a NBR 16387 (2016). Das inspeções efetuadas ao longo de 2020 com o CC, foram selecionadas as viagens mais próximas das datas de registro das anomalias em todo o Trecho 1. As análises demonstraram uma divergência em relação ao que foi apresentado pelo VI. Para

o mesmo segmento, o CC não apresentou valores que representassem um nível de necessidade de manutenção iminente para seus parâmetros principais, respeitando os limites estabelecidos pela NBR 16387 (2016) e definidos pela concessionária que administra a ferrovia. A exceção ocorre apenas nos locais onde foram identificados pontos de restrição correspondentes à RH68 e à RH67, conforme indicado na Figura 54. No entanto, essas restrições não afetam as operações, uma vez que as composições não operam a velocidades nas quais a norma orienta a restrição. Assim, os parâmetros geométricos foram avaliados separadamente para os casos das Curvas 2 e 5, e os resultados estão apresentados no Apêndice D.

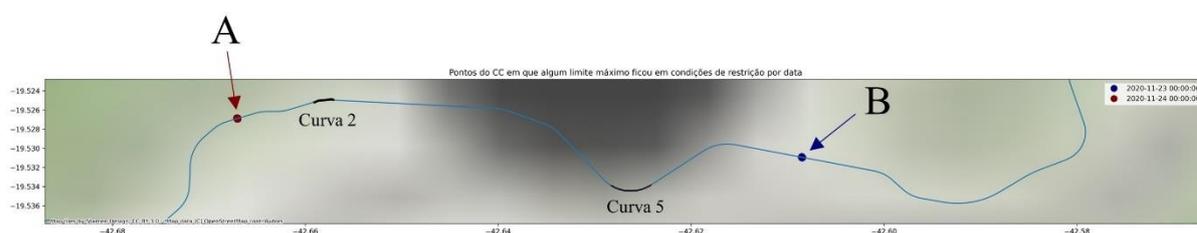


Figura 54 – Pontos onde recomenda-se atenção devido ao primeiro nível de restrição de velocidade previsto pela normativa

Observou-se que quando avaliado individualmente cada parâmetro definido pela ABNT NBR 16387 (2016) (bitola, alinhamento, nivelamento transversal e curvatura), os mesmos encontram-se adequados, com exceção do nivelamento transversal para uma corda de 2 m, onde o limite foi excedido.

No início da curva, identificou-se um excesso em relação à norma em dois pontos. Sendo assim, desvios dessa magnitude impactariam a primeira faixa da velocidade máxima autorizada (96 – 128km/h), e no final da curva, a segunda faixa (65 – 95 km/h). Essa condição imporia restrições à operação, limitando-a de acordo com os níveis estabelecidos pela NBR 16387 (2016). Os pontos da via onde esses parâmetros foram ultrapassados encontram-se próximos ao km 450 + 690 e ao km 450 + 900. Além disso, examinando outras características desses mesmos pontos, notou-se a presença de pequenos picos para os demais parâmetros, que permaneceram dentro dos limites correspondentes, mas indicando a existência de perturbações geométricas na via. Portanto, optou-se por filtrar o segmento nos registros de ocorrências, para ver quais anomalias foram encontradas durante esse período, mas nenhum registro de distúrbio foi constatado para as RH67 e RH68. O resultado do procedimento é apresentado na Tabela 7, retratando dois instantes em que houve ocorrências na Curva 2 (a primeira em março e a segunda em novembro, identificadas na planilha como um princípio de desnivelamento).

Tabela 7 – Registros de ocorrências filtrado para o elemento Curva 2 dentro do Trecho 1 para o ano de 2020

Data de ocorrência	Eh-Rh	Linha	Componente	Elemento	Classificação	Km inicial	Km final	Modo
2020-03-03 13:20:00	67/68	1	Geometria	67/68 L1 CURVA 2	restrição	446600	447500	Desnivelamento Longitudinal
2020-11-28 15:09:00	67/68	1	Geometria	67/68 L1 CURVA 2	defeito	447150	447600	Desnivelamento Transversal

Além disso, de acordo com o relatório da equipe de manutenção, foram identificados pontos de forte balanço no segmento em março. Após inspeção da equipe no local, foi detectado início de desalinhamento em alguns pontos na linha, sendo agendado procedimento de socaria para reparo da geometria.

De forma investigativa, avaliou-se também possíveis impactos decorrentes das precipitações no elemento. Verificando o histórico de média acumulada de precipitação na região da EFVM a partir das datas das inspeções realizadas pelo CC, é possível identificar que o período com maior acúmulo de chuva para a região estudada foi em novembro. A intensidade das chuvas foi medida por meio da relação entre o volume (em mm) e seu tempo de duração (em horas), mas como não coincidiu nenhuma inspeção com o fenômeno meteorológico de ocorrerem em um mesmo momento, optou-se por avaliar intervalos de 3 e 10 dias (Figura 55 e Figura 56, respectivamente), onde a possibilidade do solo estar saturado e a presença de água com finos nas camadas do pavimento ferroviário seria maior.

Conforme Merheb (2014), em uma condição de um lastro contaminado associado com a presença de água, ocorre uma mudança em seu comportamento mecânico, diminuindo sua rigidez e acentuando o incremento dinâmico no sistema. Isso devido à menor dissipação das tensões pelo lastro e maior transferência de esforços ao subleito, podendo afetar a geometria da via. A precipitação acumulada foi de 0,68 mm para o cenário de 3 dias, antes da ocorrência na Curva 2. Ao se observar até 10 dias antes do evento, o valor acumulado da curva foi de 15,02 mm. Neste cenário, para as metodologias utilizadas no estudo (SD, CoSD e NBR), é possível afirmar que não houve efeito perceptível nos parâmetros geométricos associados às condições meteorológicas de precipitação neste período.

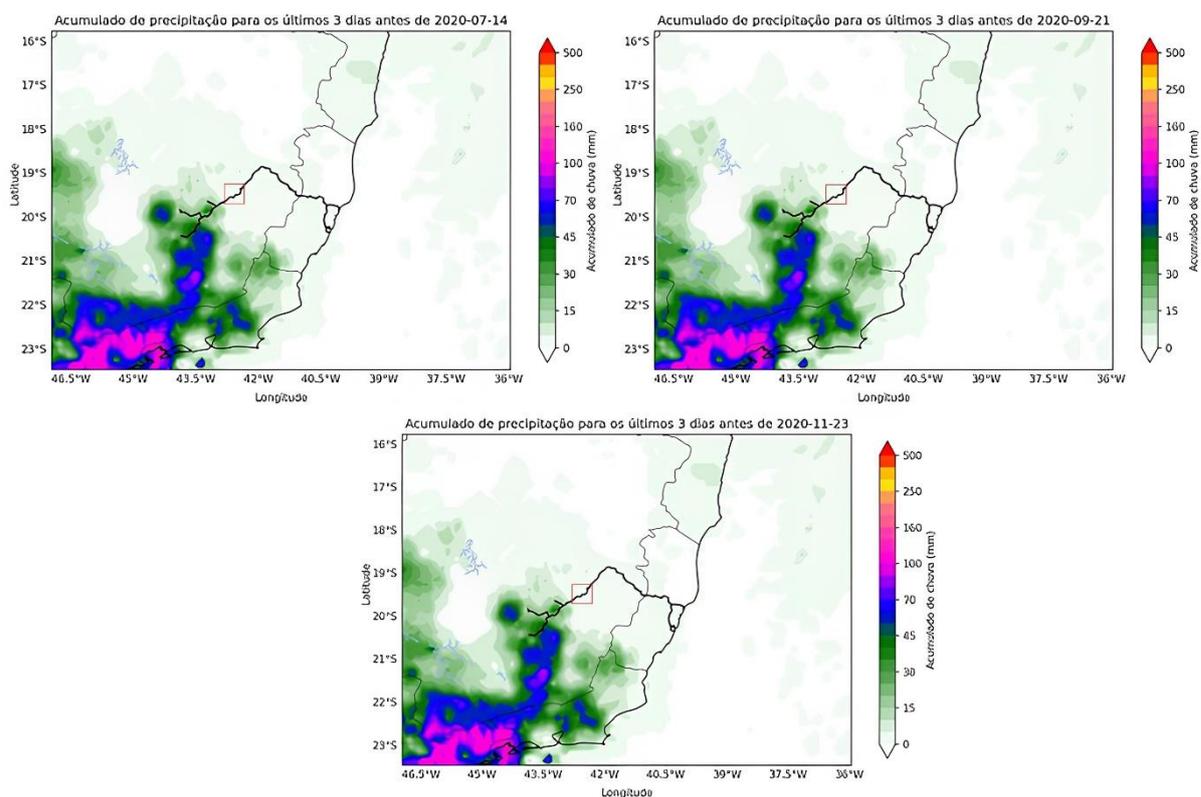


Figura 55 – Acumulado de precipitação para os últimos três dias antes das inspeções realizadas pelo CC em julho, setembro e novembro. Identificado pelo quadrado vermelho a região estudada

Fonte: Fernando Cossetin.

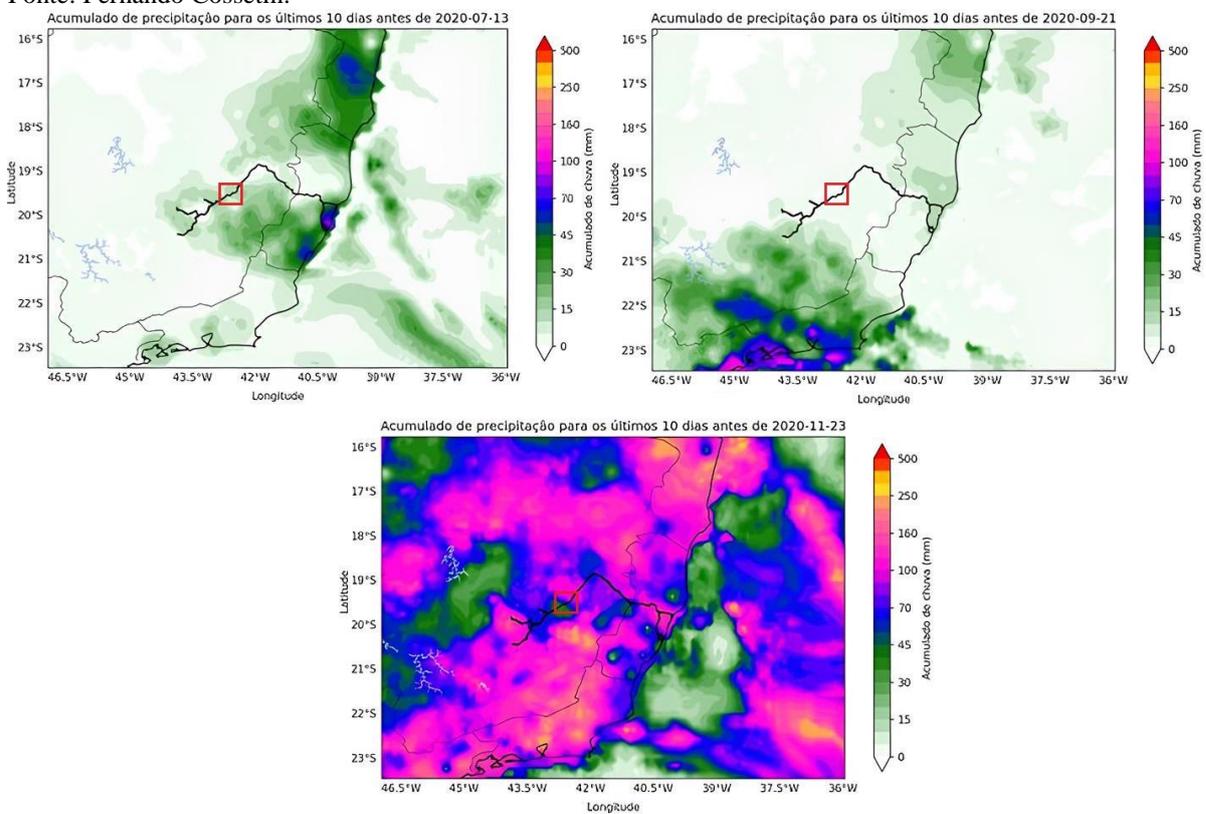


Figura 56 – Acumulado de precipitação para os últimos dez dias antes das inspeções realizadas pelo CC em julho, setembro e novembro. Identificado pelo quadrado vermelho a região estudada

Fonte: Fernando Cossetin.

Após todo o processo de verificação das informações contidas no VI, CC e no relatório de ocorrências ferroviárias, a equipe de engenharia de manutenção realizou uma inspeção visual imediatamente após observar uma perturbação na Curva 2. O objetivo foi confirmar qual problema ocorreu, além de ter sido uma etapa adicional para validar as inspeções realizadas.

Uma vez que o estudo comparativo incluiu diversas inspeções e ações na via ao longo do ano de 2020, optou-se por criar uma cronologia (Figura 57), com respectivos marcos temporais para este elemento (Curva 2) de suas inspeções com VI, CC e visual, inclusive os meses em que foram detectados desvios e manutenções na linha, de forma a resumir todo o procedimento empreendido no processo.

Conforme a Figura 57, os históricos do trecho mostram que a viagem com CC mais próxima dos eventos neste elemento foi aproximadamente quatro meses após a manutenção corretiva em março e, também, cerca de quatro meses antes do registro da segunda ocorrência. Para o VI, a viagem com melhor qualidade de dados foi a viagem 11, pouco menos de um mês após a inspeção do CC, onde visualmente houve uma dispersão dos registros, próximo de três meses do evento.

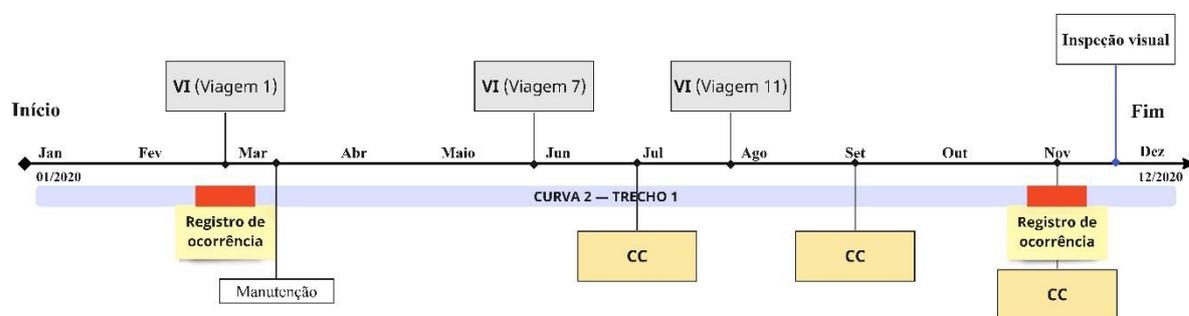


Figura 57 – Principais marcos na linha do tempo referente ao elemento Curva 2 ao longo do ano de 2020

No local foi confirmada a presença de desvios de geometria na via, relacionada a irregularidades no nivelamento longitudinal (Figura 58). Uma vez que esta condição poderia ser verificada sem o auxílio de equipamentos de medição manual, já corresponderia a um nível onde seria recomendada a manutenção a ser incluída no planejamento das intervenções.

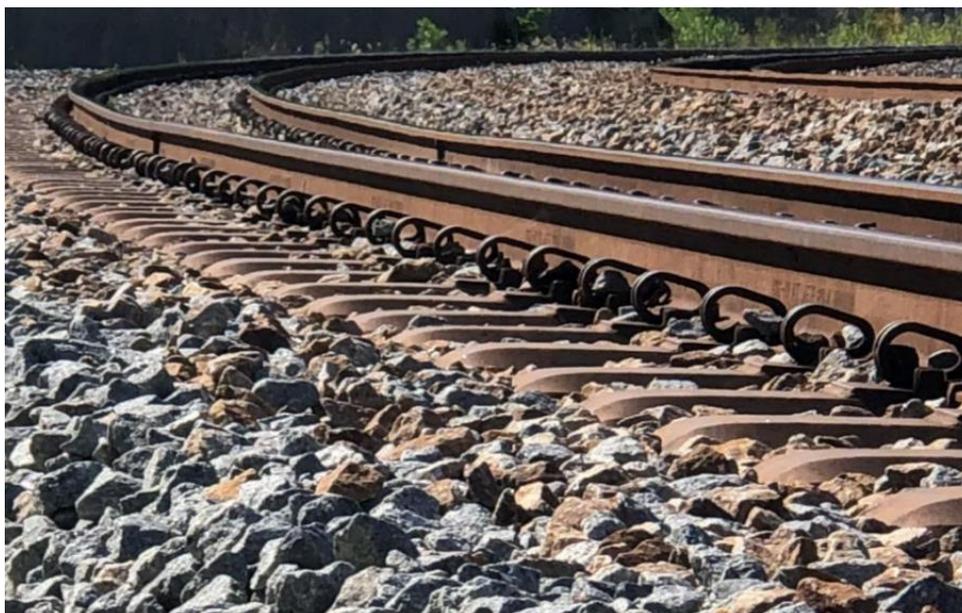


Figura 58 – Inspeção realizada em campo na Curva 2 do Trecho 1, constatando princípio de desnivelamento na via

Fonte: Luciano Cassaro

Pela vistoria também foi identificada a troca recente do dormente (Figura 59), visto que o dormente antigo apresentava sinais claros de avarias. Não há a informação referente à data da substituição, mas como os dormentes trocados ainda estavam posicionados na lateral da via, tratava-se de uma intervenção bastante recente, o que pode justificar o valor de aceleração mais elevado para o mês de março na viagem 1 do VI.



Figura 59 - Identificado a troca recente de dormente quebrado no elemento Curva 2 para o Trecho 1 durante a inspeção de campo de outubro
Fonte: Luciano Cassaro

Demonstrou-se, assim, que a utilização de um equipamento de inspeção indireta da via constatou previamente, a possibilidade futura de ocorrência de uma anomalia, onde para este caso, o CC indicou pequenas irregularidades na via (mas que face aos limites estabelecidos pela disposição normativa, não precisariam de intervenção). Durante a vistoria ainda foi possível identificar pontos com a presença de finos no lastro (Figura 60). Esses fatores podem contribuir para acentuar a degradação da via neste local.

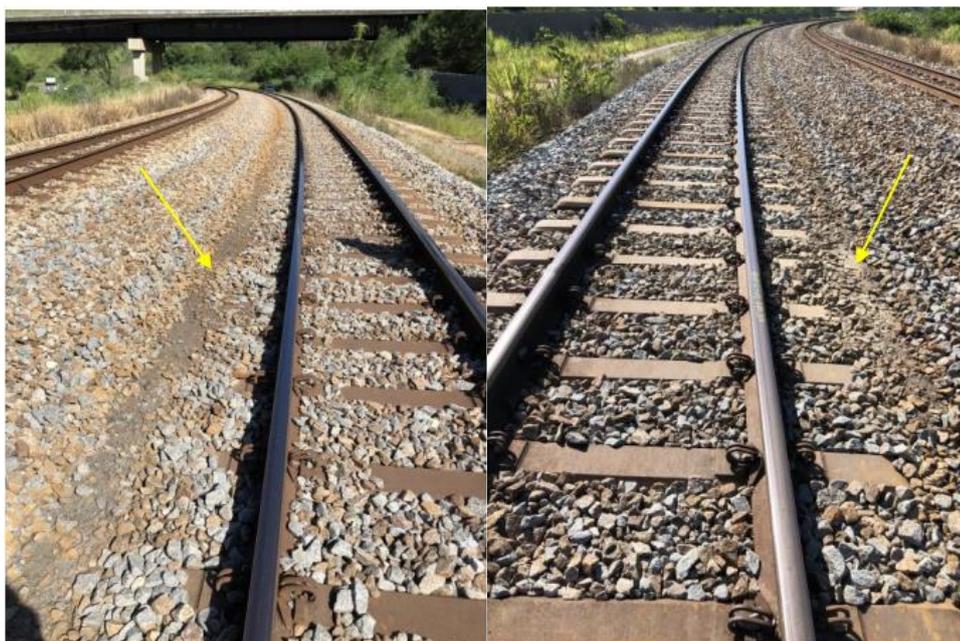


Figura 60 – Constatação da presença de finos na superfície da superestrutura lastreada durante a inspeção visual na Curva 2 do Trecho 1
Fonte: Luciano Cassaro

Além das anomalias identificadas por inspeção visual, durante a inspeção realizada em novembro no mesmo segmento foi constatado desgaste no jacaré do travador, o que resultou em uma restrição de tráfego (redução de velocidade), consistente com a premissa de segurança da concessionária, até que uma avaliação mais detalhada da anomalia fosse feita. Esta informação pode justificar a presença de dados com desvios padrão superiores a mais ou menos um nesta viagem do VI.

Ao avaliar a correlação dos parâmetros medidos pelo CC e VI para os mesmos pontos (georreferenciados corretamente), condicionando-a para as viagens mais próximas da ocorrência (para o VI em agosto e para o CC em novembro), não foi constatada correlação entre os atributos dos equipamentos para as inspeções selecionadas (Figura 61).

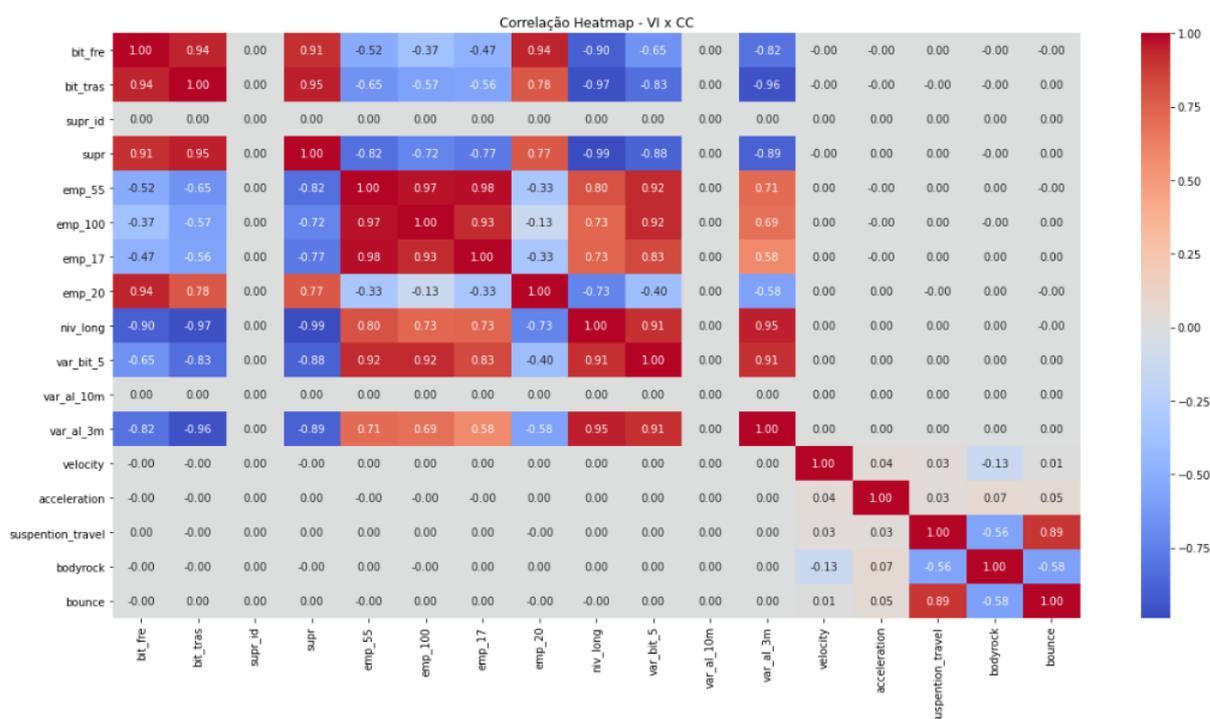


Figura 61 – Mapa de calor da correlação entre os principais atributos do CC e VI para as viagens de novembro e agosto para os mesmos pontos georreferenciados na Curva 2

Como citado anteriormente, no levantamento do VI do Trecho 1, observou-se que a Curva 5 possui registros que destoaram da tendência média, e por conseguinte, seus dados também foram selecionados para maior apuração.

As análises individuais dos parâmetros (presentes no apêndice E) permitiram identificar tanto no início, quanto no final da Curva 5, valores com maior intensidade, principalmente para os atributos nivelamento e empeno. Como resultado, houve evidência de uma alteração preliminar na geometria da via. As causas não foram possíveis de se determinar sem a realização de uma inspeção na região. Mas, alinhando as informações contidas em ambos os equipamentos de inspeção, foi possível afirmar que a via se encontrava em um estado de degradação mais elevado. A hipótese inicial que foi validada após a filtragem dos dados de registros de anomalias do segmento (Tabela 8). Conforme as informações contidas na planilha, foi identificado um balanço durante a passagem da composição. Após a perícia no local indicado, um desnivelamento longitudinal na linha foi detectado e corrigido depois de feita a socaria e nivelamento. Tal situação se mostrou condizente com a variação do parâmetro nivelamento mensurado pelo CC.

Tabela 8 – Registros de ocorrências filtrado para o elemento Curva 5 dentro do Trecho 1 para o ano de 2020

Data de ocorrência	Eh-Rh	Linha	Componente	Elemento	Classificação	Km inicial	Km final	Modo
2020-11-05 02:11:00	67/68	1	Geometria	67/68 L1 CURVA 5	Defeito	450700	451000	Desnivelamento Longitudinal

A investigação de acúmulo de chuva na Curva 5 resultou em 11,75 mm e 38,26 mm para os intervalos de até três e até dez dias, respectivamente. Trata-se de níveis bem superiores aos encontrados na Curva 2, porém os resultados permitem afirmar que não houve correlação entre precipitação e condição da geometria da via neste caso.

Como as inspeções nos dois equipamentos registraram variações geométricas e na dinâmica do vagão, uma vistoria visual foi realizada em todo o elemento. Para resumir as ações realizadas na Curva 5, também foi elaborada sua linha do tempo (Figura 62). Neste caso a inspeção do CC foi bem próxima à data do registro da ocorrência, enquanto com o VI, foi verificada quase três meses antes do evento (tendo sido observada visualmente houve uma dispersão dos registros), e há cerca de 2 meses da viagem do CC.

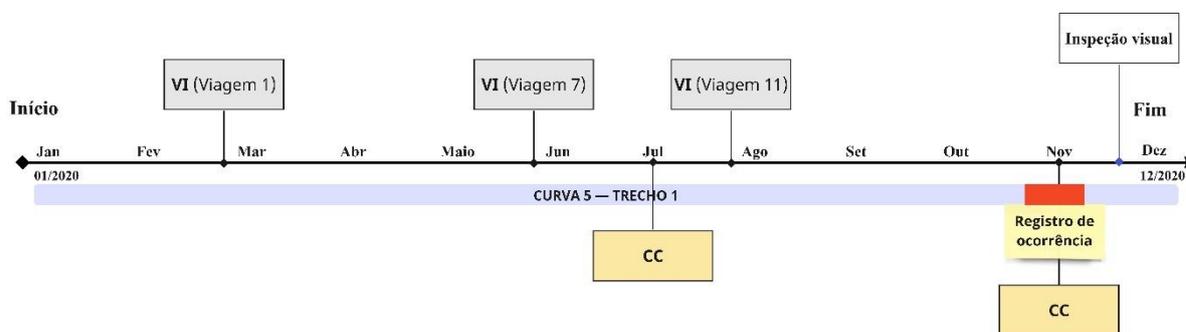


Figura 62 – Principais marcos na linha do tempo referente ao elemento Curva 5 ao longo do ano de 2020

Nesta inspeção complementar, seguindo as orientações dos levantamentos dos equipamentos, foi verificada as condições para entrada (Figura 63) e saída (Figura 64) da curva. Conforme os registros das imagens do local, foram encontrados alguns dormentes quebrados, que possivelmente promoveram uma oscilação maior, que foi constatada pelo VI nos parâmetros *Bounce*, *BodyRock* e *Suspention Travel*

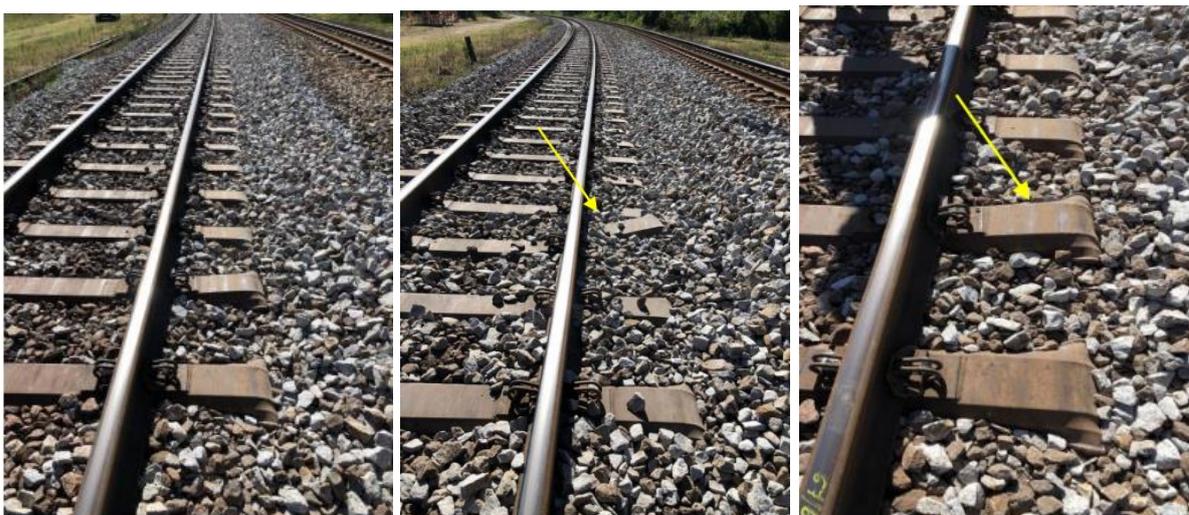


Figura 63 – Inspeção visual para a entrada da Curva 5, onde verificou-se a presença de alguns dormentes quebrados
Fonte: Luciano Cassaro

Ficou claro que a precisão do posicionamento dos dados do CC foi bastante satisfatória. A partir deles foi possível identificar as regiões que seriam necessárias aferições de campo para confirmação de problemas geométricos. Na região final do elemento, foi constatada a presença de grande quantidade de finos entre os trilhos e na região próxima ao gabarito da linha. Essa situação também foi identificada para a entrada da curva durante a passagem do VI. O CC identificou corretamente o pequeno desnivelamento longitudinal que, aliado à rigidez superior do lastro, deve ter promovido a maior resposta oscilatória do material rodante. Com complemento da inspeção visual, observou-se a necessidade de troca de dormentes e a validade das informações obtidas por ambos os equipamentos. Para o segmento, foi elaborado um plano de renovação.

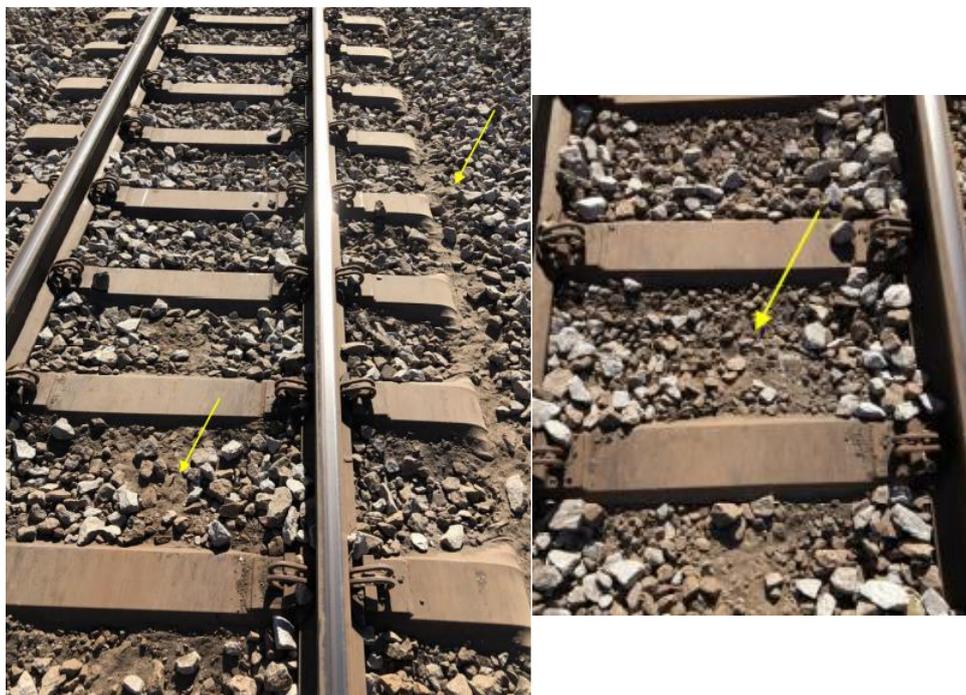


Figura 64 – Inspeção visual para a saída da Curva 5, onde foi identificado a contaminação do lastro por finos
Fonte: Luciano Cassaro

Também foi verificada a correlação dos parâmetros medidos pelos equipamentos nos mesmos pontos (georreferenciados corretamente), condicionando-a às viagens mais próximas da ocorrência (para o VI em agosto e para o CC em novembro). Não foi identificada correlação entre os equipamentos (Figura 65). Nessas condições avaliadas, tanto para Curva 2, quanto para a Curva 5, permite-se apontar que um equipamento não deve substituir o emprego do outro.

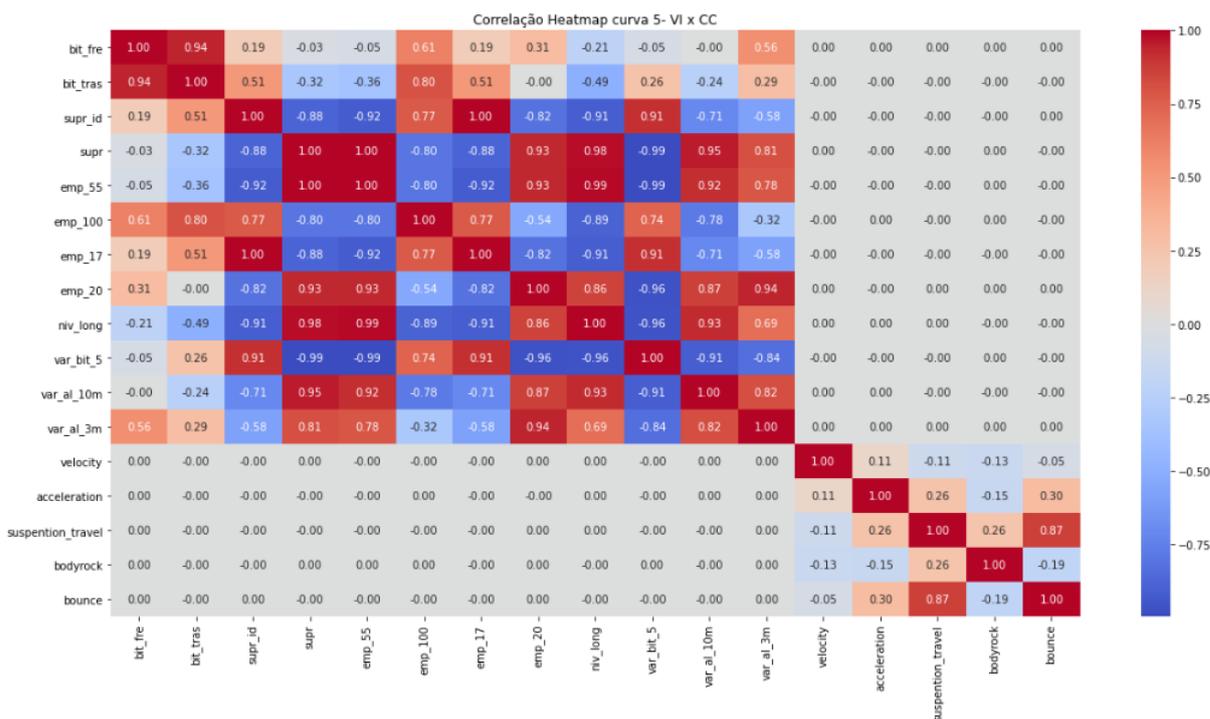


Figura 65 – Mapa de calor da correlação entre os principais atributos do CC e VI para as viagens de novembro e agosto para os mesmos pontos georreferenciados na Curva 5

A metodologia utilizada neste trabalho permitiu uma análise mais aprofundada em relação aos métodos utilizados para avaliar as condições da via neste estudo de caso. Empregou-se uma avaliação individual de desvio padrão para os dados do VI, associado ao uso do método CoSD, SD e avaliação individual dos parâmetros pela normativa brasileira. Além desses métodos empreendeu-se o uso da ferramenta *DataMap*, que permite aplicar um modelo de aprendizado de máquina aos dados provenientes do VI. O intuito foi enriquecer os comparativos e potencializar a definição das estratégias de inspeção e consumo da informação proveniente de diferentes equipamentos. Ao aplicar a ferramenta, os dados coletados ao longo de toda a ferrovia EFVM foram divididos em quatro níveis, cada um representado por um conjunto de cores distintas para fins ilustrativos: azul, verde, azul claro e rosa, conforme demonstrado na Figura 66.

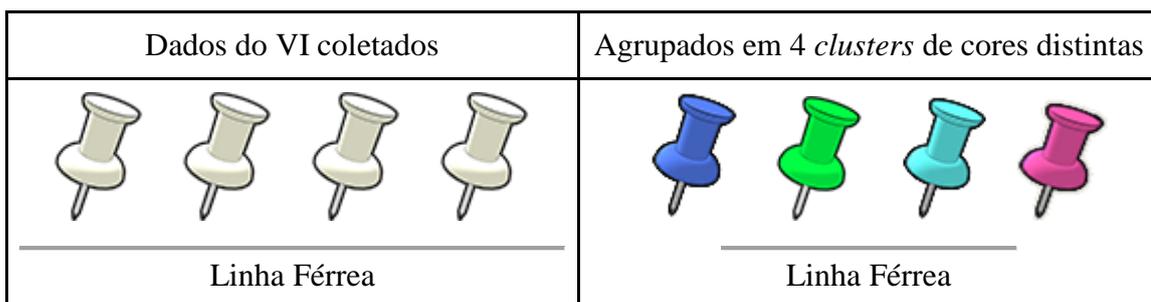


Figura 66 – Representação de pontos do VI em clusters, cada *cluster* correspondendo a uma cor distinta

Neste estudo, a seleção de dados foi realizada, e somente as observações para a linha corrida foram avaliadas (retirando, por exemplo, juntas, pontes e aparelhos de mudança de via), tendo como única exceção a região de RH. Aplicou-se o algoritmo *K-means* e o resultado de seu agrupamento foi exportado em arquivo de extensão KML para facilitar sua visualização (Figura 67). Ainda nessa diretriz, para se facilitar a visualização dos agrupamentos no mapa, foi empregada uma estratégia de conectar pontos por pequenas seções, mostrando o padrão de agrupamento de cada seção.

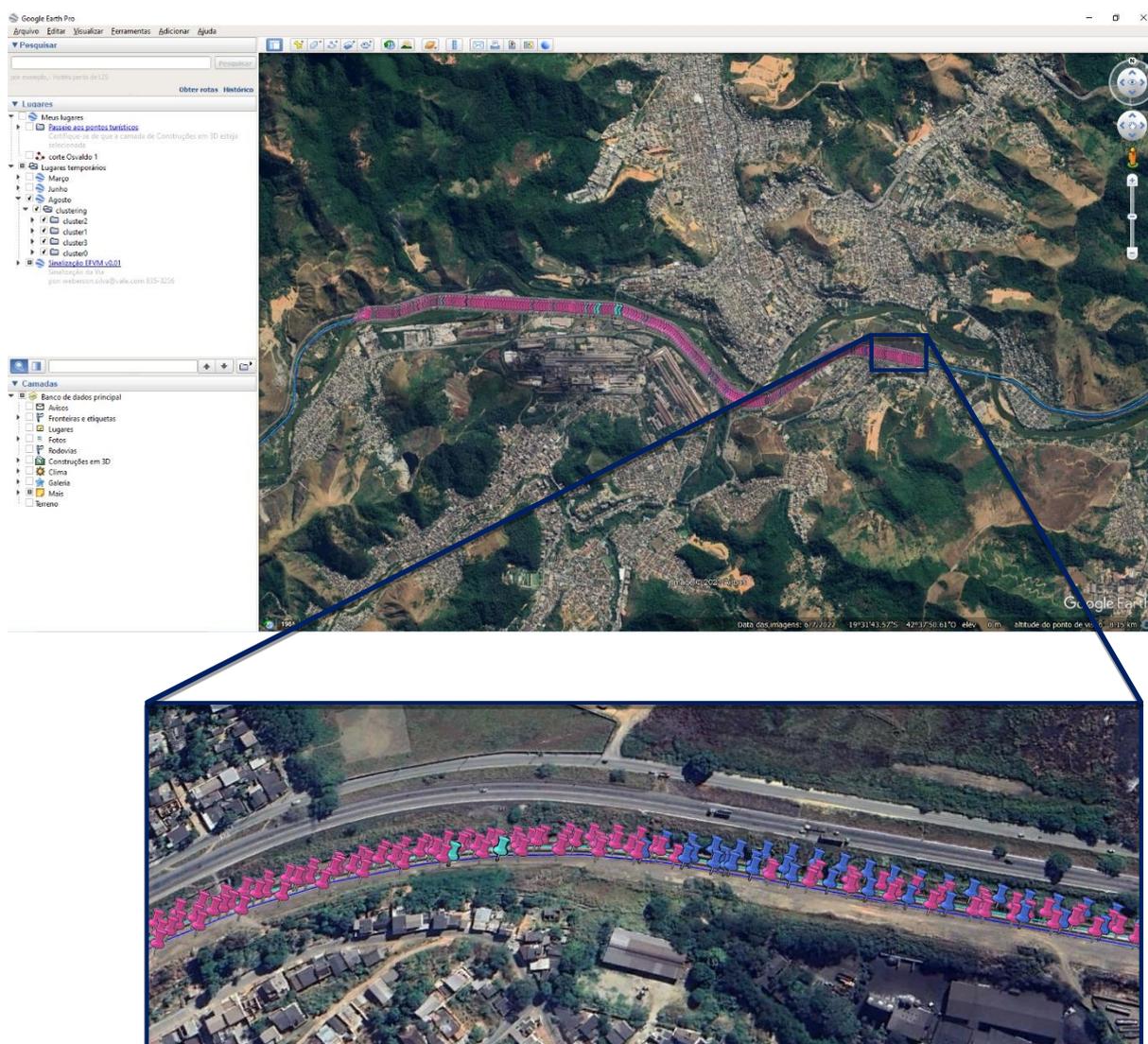


Figura 67 – Export em Kml da ferramenta DataViz após a aplicação do modelo de *clustering* dos dados das viagens do VI para um segmento experimental, onde foram agrupados em 4 cores distintas representando diferentes níveis de severidade da via

O critério pela ferramenta permite associar os *clusters* a diferentes níveis de severidade da via estudada em uma escala que varia do nível “sem severidade” até “severidade 1”, conforme

representado pela Figura 68. Quanto pior a condição, os dados serão agrupados como *cluster* de severidade 1, mas quanto melhor sua condição, eles serão rotulados como *cluster* sem severidade.

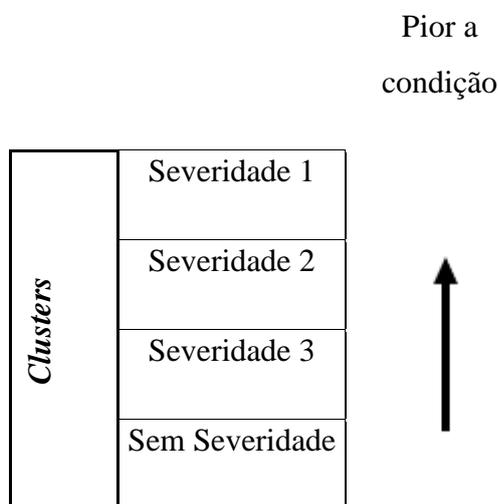


Figura 68 – Representação dos níveis de severidade em relação a sua associação com as condições encontradas na via

Aplicando-se a ferramenta, obteve-se o relatório para cada *cluster* e mapa *kmz*, indicados na Tabela 9 e Figura 69, respectivamente. Cabe mencionar que à medida que novos dados são inseridos a cada viagem processada pela ferramenta, o modelo vai sendo aprimorado para se adaptar às características específicas da EFVM. Mesmo com um número limitado de registros quando se considera a temporalidade, foi possível aplicá-lo no estudo.

Tabela 9 – Resultados do algoritmo de clusterização empregado pela ferramenta *DataMap* para os dados provenientes do VI levantados durante o ano de 2020 para a situação da via no mês de agosto

Viagem	Total	Cluster severidade 1	%	Cluster Sem severidade	%	Cluster Severidade 2	%	Cluster severidade 3	%
Março	439	42	10%	173	39%	61	14%	163	37%
Junho	1211	205	17%	408	34%	234	19%	364	30%
Agosto	3683	439	12%	1290	35%	772	21%	1182	32%



Figura 69 - *Cluster* correlacionado a maior severidade para a viagem de agosto

Com a passagem do tempo, a proporção dos *clusters* permaneceu consistente, incluindo a disposição dos *clusters* associados à severidade 1 ao longo do trecho estudado. O *DataMap* identificou agrupamentos de dados próximos às RHs, exatamente na exceção adotada antes da aplicação da ferramenta. Nessa região encontram-se aparelhos de mudança de via, que não foi possível filtrá-lo pela falta dessa informação, sendo assim, possivelmente foram os pontos onde o modelo indicou uma severidade mais elevada. Além disso, observam-se áreas de atenção em locais que incluíam os seguintes elementos: Curva 3, Tangente 7, Curva 6, Tangente 5, Curva 9, RH 68, RH 67, Curva 2 e Curva 5.

Nesse trecho de 10 km, o método identificou praticamente todas as zonas de transição entre uma tangente e uma curva como pontos de atenção. Isso não se deve à presença de algum distúrbio, mas sim a uma característica intrínseca dessas regiões. Por esse motivo, não foram contabilizados como pontos de atenção. No entanto, esses falsos positivos tendem a ser corrigidos à medida que a ferramenta é usada e mais dados são inseridos.

Por meio dos elementos da via que apresentam um estado superior de degradação, foi possível criar um quadro comparativo entre os índices, avaliando se houve registros de ocorrência no ano de 2020 para cada caso. Pela Tabela 10, é evidente a diferença entre as metodologias e as semelhanças entre elas. O *DataMap* e o CoSD foram os que apresentaram comportamento semelhante, identificando praticamente os mesmos elementos. Por outro lado, o VI e a NBR tiveram pouca contribuição como métodos avaliadores nesta situação específica. Para resumir os métodos aplicados e seus alertas correspondentes, estes constam na Tabela 10.

Tabela 10 – Resumo dos elementos identificados como ponto de atenção para cada método aplicado no estudo, avaliando se foi identificado alguma ocorrência para o ano de 2020

EH	Elemento	Método					Ocorrência?
		VI	DataMap	CoSD	SD	NBR	
EH67-68	RH 68	✘	✓	✘	✓	✓	N.I
	RH 67	✘	✓	✘	✓	✓	N.I
	CURVA 2	✓	✓	✓	✓	✘	nov/20
	CURVA 5	✓	✓	✘	✘	✘	nov/20
	TANGENTE 3	✘	✘	✓	✓	✘	set/20
	CURVA 3	✘	✓	✓	✓	✘	jan/20
	TANGENTE 7	✘	✓	✘	✘	✘	jan/20
	CURVA 6	✘	✓	✓	✓	✘	N.I
	TANGENTE 5	✘	✓	✘	✓	✘	N.I
EH66-67	CURVA 9	✘	✓	✓	✓	✘	fev/20

Obs: N.I- Não informado; ✓ - identificado pelo método como ponto de atenção; ✘ - não identificado pelo método.

A avaliação dos atributos do VI por meio do seu desvio padrão de forma individual não foi uma boa estratégia nas condições desta pesquisa. A qualidade dos registros afetou diretamente o seu desempenho como indicador de anomalias, tendo sido seu melhor uso para aferições pontuais, com o intuito de identificar possíveis causas ou efeitos dos distúrbios na via.

O *DataMap* (que faz uso de aprendizagem de máquina), tende a melhorar à medida que mais dados sejam fornecidos e consumidos por ela. Mesmo para uma base de dados restritas ao ano de 2020, este estudo demonstrou que o uso de aprendizagem de máquina utilizando técnicas de agrupamento dos parâmetros (avaliando-os de forma associada), pode ser bastante efetivo.

O uso do desvio padrão pelo método EN 13848-5 (2008) como um indicador da condição da via foi bastante satisfatório, quase equivalente ao CoSD, porém como observado no *DataMap*, as análises com atributos associados se mostraram como provavelmente estratégia de maior potencial para representar as condições reais da via, dentro das condições desta pesquisa.

Com o emprego da NBR 16387 (2016) no estudo, fica claro que esta especificação poderia ser aprimorada para a avaliação da condição da ferrovia, embora seu uso já seja interessante para entender o que os dados representam em termos de geometria e auxiliar a estabelecer a melhor solução de manutenção.

5 CONCLUSÃO E COMENTÁRIOS

Neste estudo buscou-se fornecer *insights* para o sistema de gerenciamento, a fim de melhorar a previsão de distúrbios na geometria e otimizar o planejamento das manutenções e substituições dos ativos. Para isso, ao longo de 2020, utilizou-se dados levantados de sensores embarcados em um vagão comercial (o VI) e de carro controle (CC) da EFVM.

No decorrer da pesquisa, as técnicas de análise exploratória de dados foram fundamentais. Isso englobou a criação de um resumo estatístico e visualizações básicas dos dados. O uso de ferramentas de programação, combinado com as representações visuais, proporcionou uma plataforma adequada para processar e compreender os registros obtidos pelo VI.

Quando aplicados os dados da precipitação média cumulativa neste estudo para examinar seu efeito na questão geométrica, ele não mostrou mudanças representativas na condição da via que mostrariam uma correlação significativa, provavelmente devido à limitação dos dados disponibilizados para este estudo. Para conseguir averiguar mais a fundo essa relação seriam de extrema relevância informações como: condição do lastro, densidade acumulada de tráfego e histórico de manutenções, que podem melhor validar as hipóteses observadas.

Para este estudo, constatou-se que é possível avaliar as condições de geometria de uma via férrea a partir do movimento do vagão. Os pontos com registros de maior intensidade para os parâmetros *BodyRock*, *Suspention Travel* e *Bounce* coincidiram com regiões de anomalias registradas. Nos casos avaliados, pode-se observar uma possível relação entre as medidas de VI e os distúrbios de geometria. Constatou-se, porém, que a melhor forma de otimizar o uso do VI nas condições desta pesquisa como equipamento de inspeção, foi utilizá-lo associado à ferramenta *DataMap*, já que não só permite melhor visualização e compreensão da informação, mas possui métodos para classificar os registros dos diferentes atributos de maneira associada.

Para o controle dos ativos, mesmo carecendo de registros e regularidade de inspeção, o VI se mostrou uma ferramenta promissora para avaliação dos pavimentos ferroviários, mas que pode

ser potencializado ainda mais, quando associado com outros equipamentos e algoritmos de aprendizado de máquina.

A análise da evolução temporal dos parâmetros pode permitir identificar as seções com irregularidades pontuais. Sob a metodologia empregada nesta pesquisa, os registros maiores que um desvio padrão observados em cada viagem do VI foram os mais importantes na avaliação da qualidade da via. Por meio deles, é que foram identificados distúrbios na via e, portanto, estudos para investigar os dados destoantes são relevantes.

Fazer o uso de uma manutenção baseada em dados permite a otimização de recursos e diversas avaliações. Além da detecção de falhas, o monitoramento contínuo dos ativos pode ser estendido, levando ao conceito de prever as condições futuras. Um sistema preditivo deve ser composto por uma detecção de falhas em tempo real e de um prognóstico de falhas futuras, determinadas pelo cálculo da probabilidade de falha em função de seu uso. Apesar da grande quantidade de registros, estes ainda não foram suficientes para elaboração de discussões acerca das possíveis equações preditivas.

Recomenda-se que o índice adequado para descrever a qualidade geométrica geral da via, deve incluir os valores de pico e a dispersão dos sinais individuais de cada parâmetro, como o CoSD, até o desenvolvimento de um índice apropriado.

Partindo da análise dos parâmetros geométricos obtidos pelo CC e utilizando o fluxo de avaliação através de registros normalizados em formato gráfico, pode-se melhor interpretar e orientar a análise. Visto que os atributos com maiores desvios apresentados no gráfico normalizado, foram os parâmetros que apresentaram dados com valores próximos ou acima dos limites admissíveis pela NBR. Sendo, portanto, pontos de atenção para as equipes de manutenção. Recomenda-se o uso desta estratégia de consumo de informação para se avaliar os dados do CC individualmente.

Na maioria dos casos, a frequência de operação do CC não é suficiente para observar como ocorrem irregularidades na geometria da via e podem efetivamente evoluir em falhas que requerem intervenção. Portanto, fica claro que a resposta dinâmica do material rodante é um critério melhor para a estratégia de manutenção da via férrea. Compreender como os desvios surgem e se tornam significativos o ajudará a desenvolver uma estratégia de manutenção eficaz.

Nessa perspectiva, espera-se que o VI promova um melhor controle no processo de manutenção da via.

Com base na fundamentação teórica e em estudos de caso conduzidos, a importância e os benefícios do uso do conhecimento da ciência de dados nas ferrovias foram demonstrados. Ficou claro que para a gestão de manutenção é fundamental realizar a estratégia técnica, envolvendo a definição de limites para uma variedade de equipamentos. Isso inclui conduzir inspeções, determinar a priorização de atividades, estabelecer níveis de monitoramento (pré-alarme e alarme) e níveis de abrangência (pontual, por elemento, EH).

Sugere-se a implementação de uma rotina de inspeção utilizando instrumentos embarcados em veículos comerciais da ferrovia. Isso visa a obtenção de dados em condições reais de uso, com uma frequência de inspeção mais elevada, associada ao uso de um veículo de avaliação de via (como o CC) e a adoção de um índice de qualidade global apropriado.

De um modo geral, neste trabalho aprofundou-se os conhecimentos sobre as avaliações da qualidade da via ferroviária utilizando instrumentos embarcados em veículos comerciais. Além de processos para viabilizar a extração, manipulação e visualização de quantidade massivas de dados. Há indícios que a associação dos equipamentos para a inspeção ferroviária pode promover a gestão efetiva dos ativos da via, tanto com o intuito de obter uma maior segurança operacional, quanto de aumentar a vida útil dos componentes ferroviários.

No âmbito desta dissertação, explorou-se os aspectos relacionados à avaliação da condição geométrica da ferrovia, empregando técnicas de análise de dados e ferramentas de programação para extrair *insights* relevantes a partir das informações coletadas pelo CC e pelo VI. No entanto, a natureza evolutiva das pesquisas e a constante busca por aprimoramento permite-se vislumbrar novos horizontes de investigação. Portanto, visando expandir a contribuição deste estudo elaboraram-se sugestões de novos trabalhos, identificando áreas que podem ser exploradas em trabalhos futuros para complementar e aprofundar a compreensão das questões abordadas nessa dissertação. Através da análise crítica dos resultados obtidos e das lacunas identificadas, esta seção explorará possíveis caminhos que podem impulsionar o avanço do conhecimento e oferecer contribuições valiosas para aprimorar as estratégias de monitoramento e manutenção de vias ferroviárias. Sugerem-se os seguintes tópicos:

- Levantamento dos ciclos de vida esperados para os tratamentos correntes de manutenção da via e seus correspondentes custos;
- Estudos para normalização de metodologia para índice de qualidade da via específico para as condições ferroviárias brasileiras;
- Adaptação e atualização da ferramenta computacional *DataMap* para suporte de priorização e otimização de programas de atividades de manutenção;
- Estudar correlação entre diferentes equipamentos para detecção de um distúrbio geométrico na via;
- Aplicar a metodologia empregada no estudo em um acompanhamento sistemático ao longo do tempo de trechos para correlacionar perda de geometria e desgaste de trilho com movimentação do vagão;
- Aprimorar banco de dados ferroviários e realizar estudo de predição de falhas integrando variáveis de diferentes equipamentos ao modelo.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 5462. **Confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira De Normas Técnicas, 1994.

ABNT NBR 16387. **Via férrea - Classificação de vias**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira De Normas Técnicas, 2016.

AREMA. **AREMA 2020 Manual for Railway Engineering**. Lanham: American Railway Engineering and Maintenance of Way Association, 2020.

BARBOSA, R. S. Vehicle dynamic response due to pavement roughness. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 33, n. 3, p. 302–307, 2011.

BERAWI, A. R. B.; DELGADO, R.; CALÇADA, R.; VALE, C. Evaluating track geometrical quality through different methodologies. **International Journal of Technology**, v. 1, n. 1, p. 38–47, 2010.

BERNAL, E.; SPIRYAGIN, M.; COLE, C. Onboard Condition Monitoring Sensors, Systems and Techniques for Freight Railway Vehicles: A Review. **IEEE Sensors Journal**, v. 19, n. 1, p. 4–24, 2019.

BUSTOS, A.; RUBIO, H.; SORIANO-HERAS, E.; CASTEJON, C. Methodology for the integration of a high-speed train in Maintenance 4.0. **Journal of Computational Design and Engineering**, v. 8, n. 6, p. 1605–1621, 2021.

CNT. **Pesquisa de Rodovias CNT 2021**. p. 231, 2021a. Disponível em: <https://pesquisarodovias.cnt.org.br/downloads/ultimaversao/Pesquisa_CNT_Rodovias_2021_Web.pdf>.

CNT. **Anuário CNT do Transporte**. Disponível em: <<https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2021/Ferroviano/2-1-/Inicial>>. Acesso em: 8 fev. 2022b.

CORRÊA JUNIOR, G. Determinantes do preço do frete rodoviário para transporte de soja em grãos em diferentes regiões brasileiras : uma análise econométrica. p. 102, 2001.

COSTA, J.; SÉRGIO, P.; MARTINS, S.; FIQUENE, M.; AUGUSTO, M.; AMARAL, J. Metodologia de priorização da manutenção de via usando dados do carro controle para aumento da segurança na EFC. **Semana de Tecnologia Metroferroviária, 22^a** ., p. 22, 2016.

DEHKTYAR, A. **Introduction to Data Science**, 2016. Disponível em: <users.csc.calpoly.edu/~dekhtyar/DATA301-Spring2016/lectures/lec03.301.pdf>.

DIEGO, G. Nos trilhos da tecnologia. **Revista CNT Transporte Atual**, v. 263, set. 2017. Disponível em: <https://anptrilhos.org.br/nos-trilhos-da-tecnologia/>.

MONTGOMERY; D. C. e .RUNGER, G. C. . **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. Tradução Verônica Calado: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2009.

EN 138488-5. **Railway applications -Track- Track geometry quality - Part 5: Geometric quality assessment**. Brussels, Belgium: CEN (European Committee for Standardization), 2008.

ESVELD, C. **Modern Railway Track**. AH Zaltbommel: MRT-Productions, 2001.

FIA. **Indústria 4.0: o que é, consequências, impactos positivos e negativos - Guia Completo**. Disponível em: <https://fia.com.br/blog/industria-4-0/>. Acesso em: 20 mar. 2021.

FORTUNATO, E. M. C. **Renovação de Plataformas Ferroviárias: estudos Relativos à Capacidade de Carga**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade do Porto, Porto, 2005. Disponível em: <http://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/11441>.

GRANDO, D. **Modelagem de Vagão Ferroviário em Sistema Multicorpos e Avaliação do Comportamento Dinâmico em Via Tangente com Desnivelamento Transversal Periódico**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos- Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

HARDIE, G.; TEW, G.; CREW, G.; OSWALD, S.; COURTNEY, M. **Track Condition Assessment and Monitoring in Heavy Haul Railroads**. 2011.

IBGE. **IBGE mapeia a infraestrutura dos transportes no Brasil**. Disponível em:

<<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/14707-asi-ibge-mapeia-a-infraestrutura-dos-transportes-no-brasil>>. Acesso em: 13 ago. 2022.

INTERNATIONAL BUSINESS MACHINES (IBM). **What is data science?** Disponível em: <<https://www.ibm.com/topics/data-science>>. Acesso em: 7 set. 2023.

JUNQUEIRA, A. S.; MOTTA D.S. , R.; OLIVEIRA, L. Análise dos métodos de avaliação geométrica de via permanente para monitoramento de via férrea no Brasil. **Transportes**, v. 31, n. 1, p. e2824, 19 abr. 2023. Disponível em: <<https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/2824>>.

KASSA, E.; SEGNI, G. Analysis of Track Geometry Index Measurement Methods. v. 40, n. July, 2022.

LAITON-BONADIEZ, C.; BRANCH-BEDOYA, J. W.; ZAPATA-CORTES, J.; PAIPA-SANABRIA, E.; ARANGO-SERNA, M. Industry 4.0 Technologies Applied to the Rail Transportation Industry: A Systematic Review. **Sensors**, v. 22, n. 7, 2022.

LASISI, A. DIMENSION REDUCTION TECHNIQUES IN TRACK GEOMETRY QUALITY ANALYSIS AND SAFETY. p. 1–23, 2016.

LASISI, A.; ATTOH-OKINE, N. Principal components analysis and track quality index: A machine learning approach. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 91, n. April, p. 230–248, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.04.001>>.

LEITE, M. R. S. V. D. **Especificações Técnicas da Via-Férrea**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2017. Disponível em: <<https://recipp.ipp.pt/handle/10400.22/12054>>.

LI, D.; HYSLIP, J.; SUSSMANN, T.; CHRISMER, S. **Railway Geotechnics**. Boca Raton: CRC Press Taylor Francis Group, 2016. 555 p.

LI, M. X. D.; BERGGREN, E. G.; BERG, M.; PERSSON, I. Assessing track geometry quality based on wavelength spectra and track–vehicle dynamic interaction. **Vehicle System Dynamics**, v. 46, n. sup1, p. 261–276, set. 2008. Disponível em:

<<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00423110801935871>>.

LINGAMANAİK, S. N.; THOMPSON, C.; NADARAJAH, N.; RAVITHARAN, R.; WIDYASTUTI, H.; CHIU, W. K. Using Instrumented Revenue Vehicles to Inspect Track Integrity and Rolling Stock Performance in a Passenger Network during Peak Times. **Procedia Engineering**, v. 188, p. 424–431, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.504>>.

LIU, R. K.; XU, P.; SUN, Z. Z.; ZOU, C.; SUN, Q. X. Establishment of track quality index standard recommendations for beijing metro. **Discrete Dynamics in Nature and Society**, v. 2015, 2015.

LIU, S.; WANG, Q.; LUO, Y. A review of applications of visual inspection technology based on image processing in the railway industry. **Transportation Safety and Environment**, v. 1, n. 3, p. 185–204, 2019.

MANTARAS, D. A.; RODRIGUEZ, P. L. **Ingenieria e Infraestructura de los Transportes - Ferrocarriles**. [s.l.] Universidad de Oviedo, 2003. 629 p.

MAZILU, T. An analysis of bogie hunting instability. **UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering**, v. 71, n. 2, p. 63–78, 2009.

MERHEB, A. H. M. **Análise mecânica do lastro ferroviário por meio de ensaios triaxiais cíclicos**. 2014. Dissertação (mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

MOBLEY, R. K. **An introduction to predictive maintenance**. 2nd. ed. Woburn: Elsevier Science, 2002.

MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W. D. O. **Estatística Básica**. São Paulo: Saraiva, 2017.

MOTTA, R. D. S.; BERNUCCI, L. L. B.; SOBRINHO, O. G.; MACHICAO, J.; JUNQUEIRA, A. S.; CESAR, T. M. G. D. M.; COSSETIN, F.; QUEIROZ, W. D. De; CALHEIROS, A. J. P.; OLIVEIRA, L.; CASSARO, L. Gestão e Análise de Dados Gerados por Veículos de Monitoramento da Estrada de Ferro Vitória Minas Através de Big Data Analytics. **Anais do VI Simpósio de Engenharia Ferroviária**, v. 1, n. 158352, p. 1–14, 2023.

MOURA, M. C. R. DE. **Caracterização da qualidade geométrica de vias ferroviárias**. 2010. Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2010.

NABOCHENKO, O.; SYSYN, M.; GERBER, U.; KRUMNOW, N. Analysis of Track Bending Stiffness and Loading Distribution Effect in Rail Support by Application of Bending Reinforcement Methods. **Urban Rail Transit**, v. 9, n. 2, p. 73–91, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s40864-023-00194-1>>.

NADARAJAH, N.; SHAMDANI, A.; HARDIE, G.; CHIU, W. K.; WIDYASTUTI, H. Prediction of railway vehicles' Dynamic behavior with machine learning algorithms. **Electronic Journal of Structural Engineering**, v. 18, n. 1, p. 38–46, 2018.

NEFTI, S.; OUSSALAH, M. A neural network approach for railway safety prediction. **Conference Proceedings - IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics**, v. 4, p. 3915–3920, 2004.

ONTL. **Boletim de Logística: A Retomada dos Investimentos Ferroviários para Aumentar a Eficiência da Matriz de Transportes**. Disponível em: <<https://ontl.infrasa.gov.br/paineis-analiticos/paineis-do-setor-ferroviario/movimentacao-ferroviaria/>>. Acesso em: 10 set. 2023.

OFFENBACHER, S.; NEUHOLD, J.; VEIT, P.; LANDGRAF, M. Analyzing major track quality indices and introducing a universally applicable tqi. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 10, n. 23, p. 1–17, 2020.

PEDRONI, P. G. **Análise de Falhas das Fraturas de Trilhos: O Caso da Ferrovia do Aço**. 2008. Monografia (Especialização em Transportes Ferroviários de Carga) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2008.

PIRES, A. C.; MENDES, G. R.; SANTOS, G. F. M.; DIAS, A. P. C.; SANTOS, A. A. Indirect identification of wheel rail contact forces of an instrumented heavy haul railway vehicle using machine learning. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 160, p. 107806, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.107806>>.

PONTA, T. H. E.; MADEIRA, D. A.; TERMINAL, R.; SÃO, I. N. Desperdícios na Manutenção Ferroviária: Perdas Por Esperas no Terminal Ferroviário de Ponta da Madeira em

São Luís, Maranhão. **Revista Produção Online**, p. 654–679, 2021.

PORTER, M. E.; HEPPELMANN, J. E. How smart, connected products are transforming companies. **Harvard Business Review**, p. 96–114, 2015. Disponível em: <<https://hbr.org/2015/10/how-smart-connected-products-are-transforming-companies>>.

PROFILLIDIS, V. A. **Railway Management and Engineering**. 3. ed. Hampshire: Ashgate Publishing Limited, 2006. 625 p.

PROFILLIDIS, V. A. **Railway Management and Engineering**. Farnham - England: Ashgate Publishing Limited, 2014.

RODRIGUES, Carlos Alceu. **Contribuição ao Planejamento da Manutenção Preditiva da Superestrutura Ferroviária**. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001

ROSA, R. de A.; RIBEIRO, R. C. H. **Estradas de Ferro: Projeto, Especificação & Construção**. Vitória: EDUFES, 2016. v. 53352

SADEGHI, J.; ASKARINEJAD, H. Influences of track structure, geometry and traffic parameters on railway deterioration. **International Journal of Engineering, Transactions B: Applications**, v. 20, n. 3, p. 291–300, 2007.

SANTOS, G. F. M. DOS. **Análise de segurança de veículo ferroviário de carga em tangente considerando a excitação periódica da via permanente**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

SANTOS, G. F. M. dos; BARBOSA, R. S.; SHU, X.; URBAN, C.; JOY, R. Sensors and Digital Signal Processing: A Review. **Journal of Transportation Engineering**, v. 2011, n. 1, p. 14025–14037, set. 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/23311916.2016.1263027>>.

SCHUMACHER, A.; EROL, S.; SIHN, W. A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises. **Procedia CIRP**, v. 52, p. 161–166, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.040>>.

SCHWAB, K. **The Fourth Industrial Revolution: what it means, how to respond**.

Disponível em: <<https://www.weforum.org/agenda/2016/01/the-fourth-industrial-revolution-what-it-means-and-how-to-respond/>>. Acesso em: 5 ago. 2023.

SELIG, E. T.; WATERS, J. M. **Track Geotechnology and Substructure Management**. New York: Thomas Telford Publications, 1994.

SHAFIULLAH, G. M.; SIMSON, S.; THOMPSON, A.; WOLFS, P. J.; ALI, S. Monitoring vertical acceleration of railway wagon using machine learning technique. **Proceedings of the 2008 International Conference on Artificial Intelligence, ICAI 2008 and Proceedings of the 2008 International Conference on Machine Learning; Models, Technologies and Applications**, n. December 2013, p. 770–775, 2008.

SILVA, E. T. F. E. **Análise da Evolução dos Defeitos de Bitola na Via Permanente da MRS Para Planejamento de Intervenções Preditivas de Manutenção**. 2006. Monografia (Especialização em Transporte Ferroviário de Carga) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2006.

SILVA, L. F. M. **Fundamentos Teórico-experimentais da Mecânica dos Pavimentos Ferroviários e Esboço de um Sistema de Gerência Aplicado à Manutenção da Via Permanente**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

SILVA, P. H. O. **Protótipo para Monitoramento da Dinâmica de Vagões Ferroviários**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, 2019.

SILVA, T. S. dos S. **Inspeção e Reabilitação de Infraestruturas Ferroviárias**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civi) - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.

SOLEIMANMEIGOUNI, I. **Predictive Models for Railway Track Geometry Degradation**. 2019. Lulea University of Technology, Lulea, Sweden, 2019. Disponível em: <<http://ltu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1286681/FULLTEXT01.pdf>>.

SONAR, T.; BALASUBRAMANIAN, V.; MALARVIZHI, S.; DUSANE, N. Indian railways on fast track with welding industry 4 . 0 : Application of internet of things and artificial intelligence. n. April, 2022.

STECH, P. H. **Parametros do projeto geometrico para trens de passageiros de alta velocidade e longo percurso**. 2012. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica - Universidade de Sao Paulo, 2012.

SUN, X.; YANG, F.; SHI, J.; KE, Z.; ZHOU, Y. On-Board Detection of Longitudinal Track Irregularity Via Axle Box Acceleration in HSR. **IEEE Access**, v. 9, n. 1, p. 14025–14037, 2021. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9326398/>>.

THOMPSON, C.; REICHL, P.; ZENG, D.; WHITE, J.; AHMED, F.; SETHI, H. Predictive maintenance approaches based on continuous monitoring systems at Rio Tinto. In: Conference on Railway Excellence, Melbourne, Australia, May, 2016, [...]. 2016.

TUDEIA, B.; FERREIRA, B.; REIS, F.; MALAQUIAS, I.; LIMONGI ARAUJO, V. **Vagão Instrumentado - Projeto do Sistema de Aquisição de Dados**. Nova Lima. ISQ Brasil, 2019.

TZANAKAKIS, K. **The Railway Track and Its Long Term Behaviour**. 1. ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. v. 2195–197 p.

VALE. **Estrada de Ferro Vitória a Minas completa 111 anos sobre os trilhos**. Disponível em: <<http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/estrada-ferro-vitoria-minas-completa-111-anos-sobre-trilhos.aspx>>. Acesso em: 29 maio. 2020.

VIGANICO, C. E. H. **Avaliação Dinâmica de Veículos Ferroviários Através de Um Sistema Multicorpos**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/27936>>.

WAN, B.; FATEC, D. E. R. H.; LARA, R.; LUCAS, E.; ALMEIDA, S. D. E.; RUBENS, F.; SANTISTA, B.; LARA, R. Principais Desafios no Modal Ferroviário nos Estados de São Paulo e no Rio de Janeiro. **XII FATECLOG**, 2021.

YEO, G. J. **Monitoring Railway Track Condition Using Inertial Sensors On An In-Service Vehicle**. 2017. Thesis (Doctor of Philosophy) - University of Birmingham Centre for Railway Research and Education, Birmingham, 2017.

ZANELLA, A.; BUI, N.; CASTELLANI, A.; VANGELISTA, L.; ZORZI, M. Internet of things for smart cities. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 1, n. 1, p. 22–32, 2014.

APÊNDICE A – ANÁLISE DOS DADOS BRUTOS DE TODAS AS VIAGENS DO VI

Como descrito anteriormente, analisaram-se os demais atributos: *BodyRock* (mm), *Bounce* (mm) e *Suspention Travel* (mm). Para cada um são apresentados na sequência:

- Boxplot*;
- Gráfico de dispersão de valores;
- Gráfico de frequência de valores;

Para a visualização foi restringido a escala dos gráficos para permitir a exclusão de valores extremos e, ao mesmo tempo, facilitar a compreensão do comportamento dessa variável (Figura 70, Figura 71 e Figura 72).

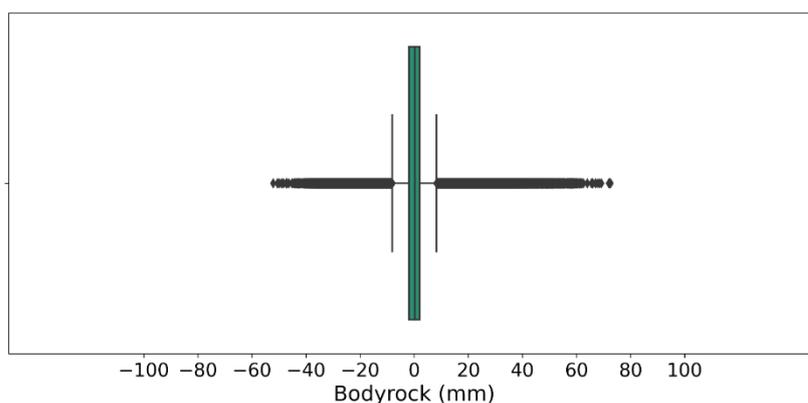


Figura 70 – *Boxplot* para o atributo *BodyRock* para todas as viagens de 2020.

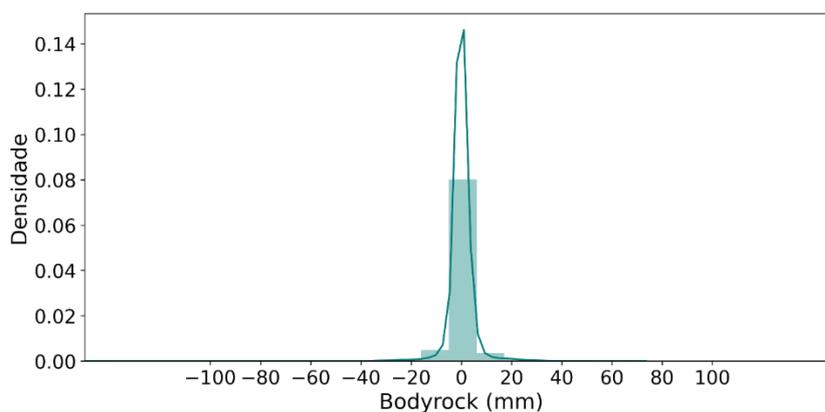


Figura 71 – Densidade para o atributo *BodyRock* para todas as viagens de 2020.

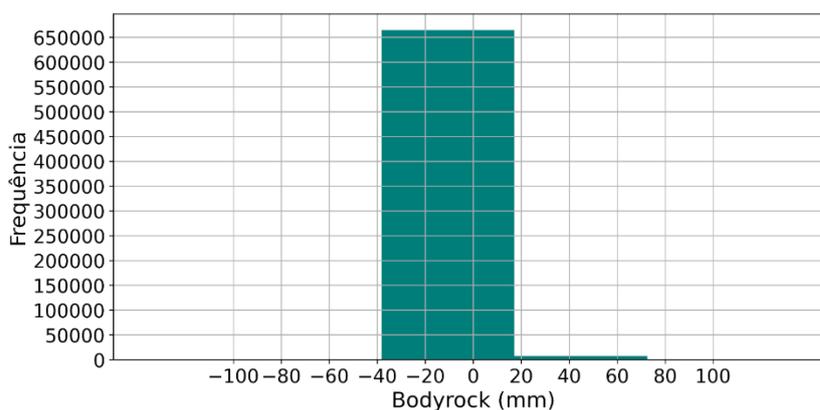


Figura 72 –Distribuição da frequência dos dados do atributo *BodyRock* para todas as viagens de 2020.

Os gráficos de densidade e de frequência mostram a frequência elevada dos dados para um intervalo de -40 a próximo de 20 mm. A presença de *outliers* também ficou evidente e sua distribuição não foi simétrica.

Em relação aos dados do atributo *Bounce* os resultados analisados são apresentados na Figura 73, Figura 74 e Figura 75 , respectivamente. Os valores mínimo e máximo do *Bounce* estão dentro do intervalo de cerca de +1512 a -35 mm. Isso mais uma vez identificou registros incoerentes e fora dos limites de deflexão da mola, indicando a presença de ruídos no atributo. Portanto, os gráficos foram ajustados para melhorar a visualização. No caso da distribuição dos registros do *Bounce* está deslocada para valores positivos. Da mesma forma que ocorreu com o parâmetro de aceleração, os valores negativos influenciaram as porcentagens dos quartis e outras medidas, fazendo com que tendessem a zero.

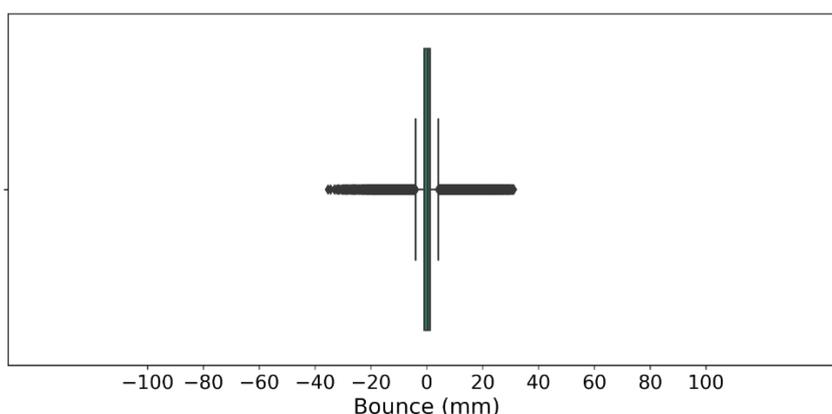


Figura 73 – *Boxplot* para o atributo *Bounce* para todas a viagens de 2020.

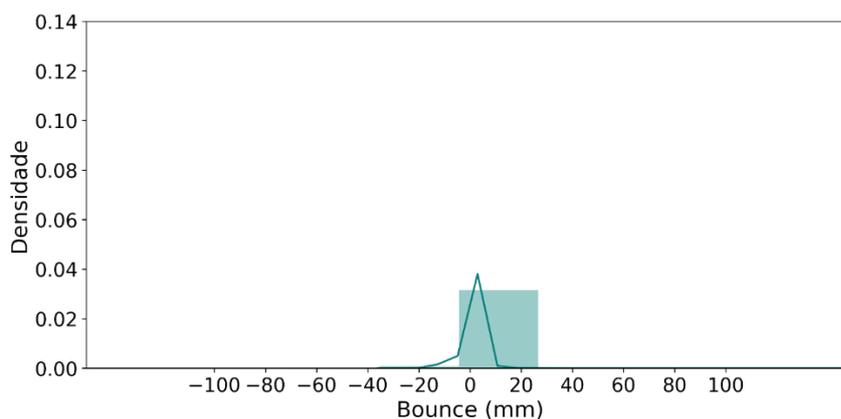


Figura 74 – Densidade para o atributo *Bounce* para todas as viagens de 2020.

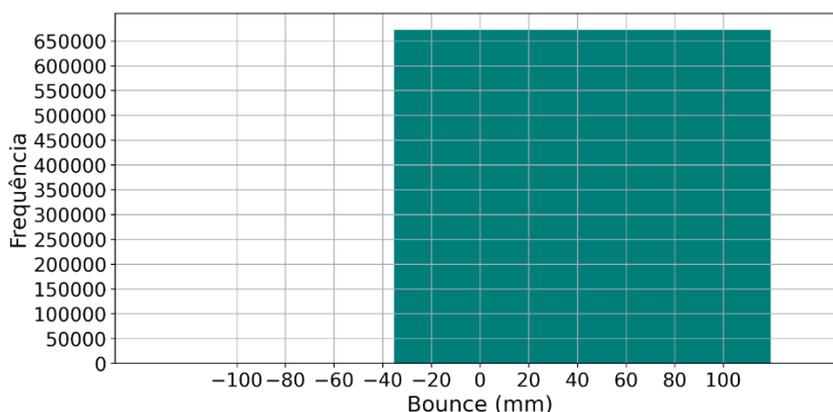


Figura 75 – Distribuição da frequência dos dados do atributo *Bounce* para todas as viagens de 2020.

Para o atributo *Suspention Travel*, aplicou-se a mesma estratégia e análise e o resultado é apresentado na Figura 76, Figura 77 e Figura 78, respectivamente. Em uma situação semelhante, foi identificada a presença de ruídos no atributo, uma vez que os dados estavam fora do limite de deflexão da mola. Portanto, ajustes foram realizados previamente para melhorar a visualização gráfica. Foi observado que os valores mínimos e máximos de *Suspention Travel* variaram entre +1752 e -54 mm. Além disso, a presença de valores negativos influenciou as medidas de centralidade, tendendo a se aproximar de zero.

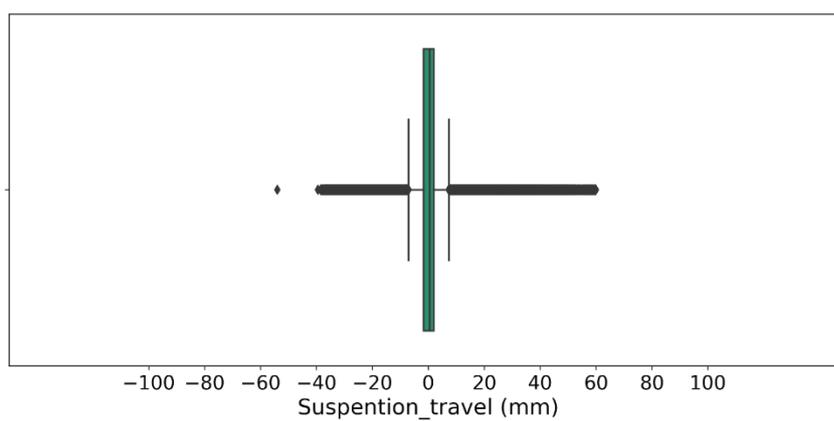


Figura 76 –*Boxplot* para o atributo *Suspention Travel* para todas a viagens de 2020.

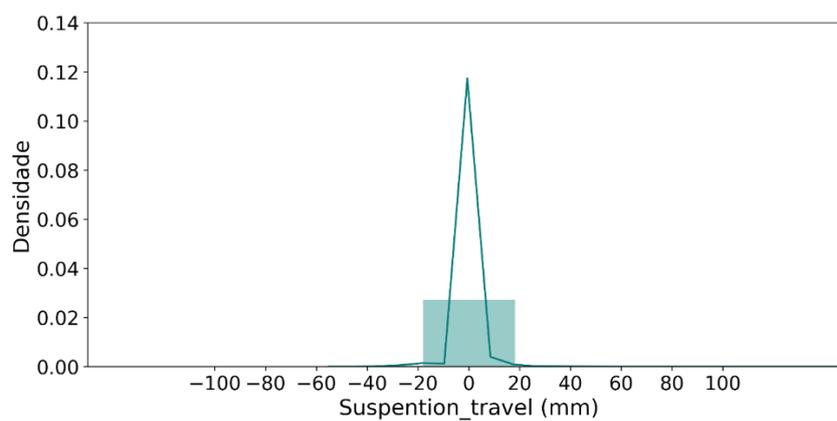


Figura 77 – Densidade para o atributo *Suspention Travel* para todas as viagens de 2020.

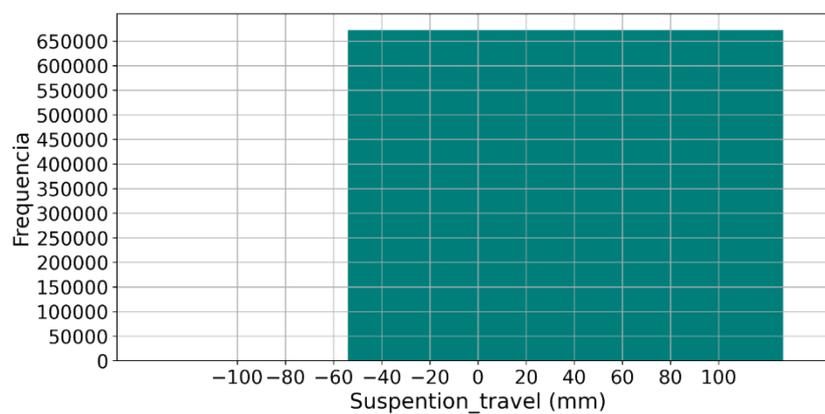


Figura 78 – Distribuição da frequência dos dados do atributo *Suspention Travel* para todas as viagens de 2020.

APÊNDICE B – ANÁLISE DOS DADOS VIAGENS 7 E 11 DO VI PARA O TRECHO**1**

Analisaram-se os atributos: (i) Aceleração (g), (ii) *BodyRock* (mm), (iii) *Bounce* (mm), (iv) *Suspention Travel* (mm) e (v) Velocidade para as viagens 7 e 11 no Trecho 1 mesmo procedimento de avaliação aplicado à viagem 1 foi repetido para as viagens subsequentes. Por conseguinte, os gráficos de histograma correspondentes à viagem 7 são apresentados pela Figura 79.

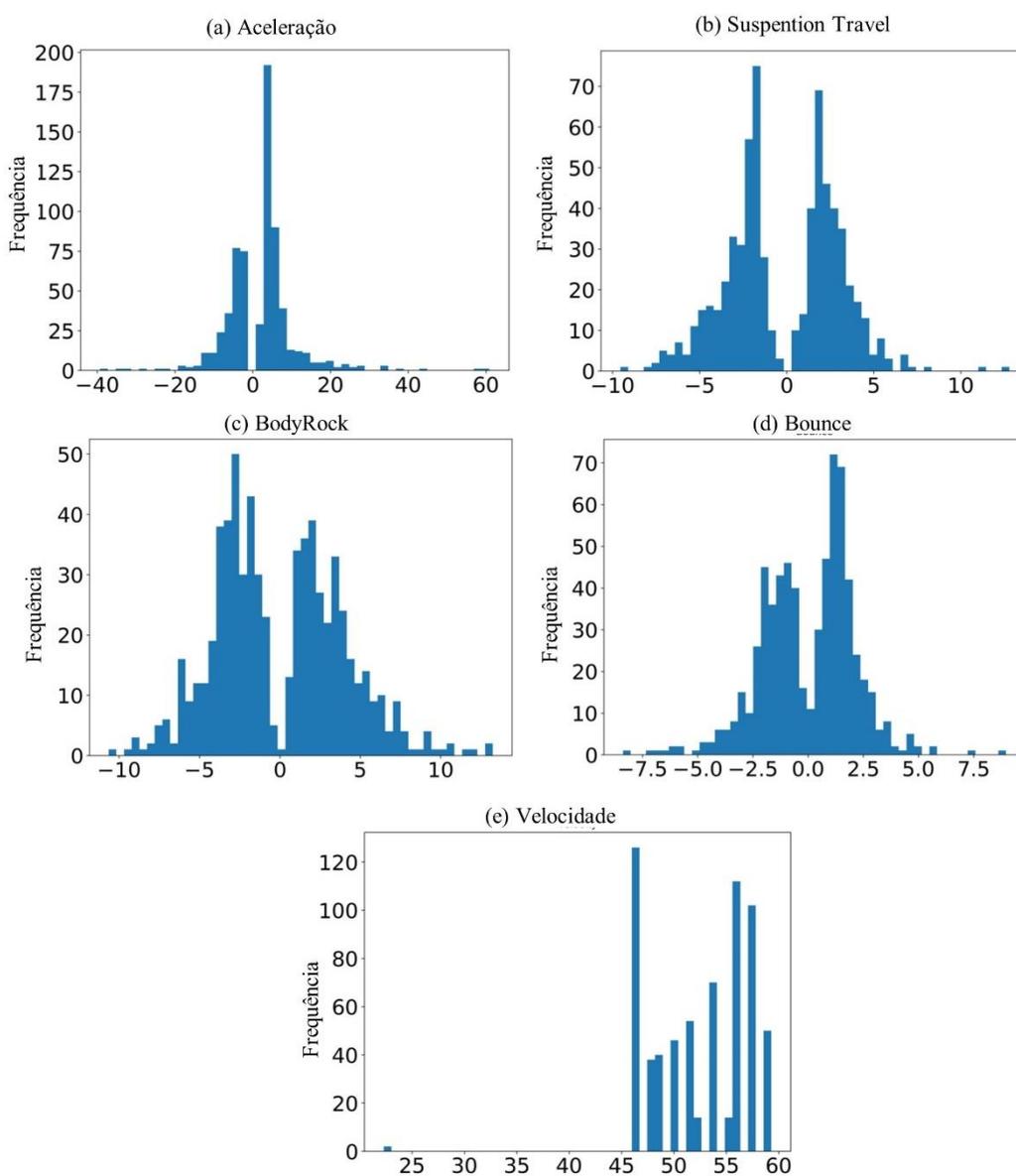


Figura 79 – Histogramas para os parâmetros Aceleração (a), *Suspention Travel* (b), *BodyRock* (c), *Bounce* (d) e Velocidade (e) da viagem 7 do VI.

De maneira geral, o comportamento dos dados da viagem 7 para Aceleração (a), *Suspention Travel* (b), *BodyRock* (c) e *Bounce* (d) reafirmam o comportamento visto anteriormente. Os histogramas são bimodais com pequenos conjuntos de *outliers*, sem simetria aparente. A exceção é para Velocidade (e) que não apresenta um comportamento bem distribuído contendo dados agrupados em intensidade de valores distintos.

O gráfico em *boxplot* com a nuvem de pontos ajuda a observar que para o atributo aceleração houve ligeiro aumento na dispersão dos registros e com a presença de mais *outliers*. Os outros atributos apresentaram um comportamento similar, com menor dispersão, e com média levemente deslocada à esquerda para *BodyRock* e *Suspention Travel*, mas a direita para o *Bounce*. Algumas medidas descritivas demonstram alteração com aumento na intensidade.

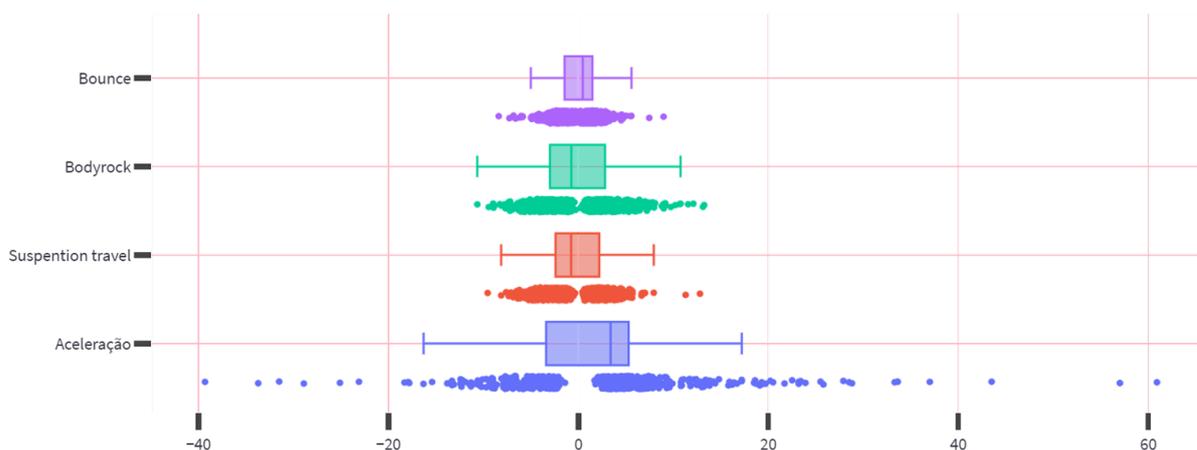


Figura 80 –*Boxplot* e pontos de distribuição dos registros para os parâmetros *Bounce*, *BodyRock*, *Suspention Travel* e *Aceleração* da viagem 7 do VI.

A viagem 7 apresentou correlação similar para os parâmetros *Bounce* e *Suspention Travel* avaliados nas correlações da viagem anterior, com diferença mínima de cerca de 0,02. Tal fato nos permite acreditar ser a relação de maior força para os dados deste trecho. Houve uma diminuição na intensidade da correlação entre *BodyRock* e *Suspention Travel*, mas continua sendo a segunda maior. Observa-se uma correlação leve entre os atributos *Bounce* e *Aceleração* (0,14), o que não foi constatado anteriormente. Investigações serão realizadas fazendo uso de alternativas de visualização de dados distintas para identificar os possíveis motivos para essas variações.

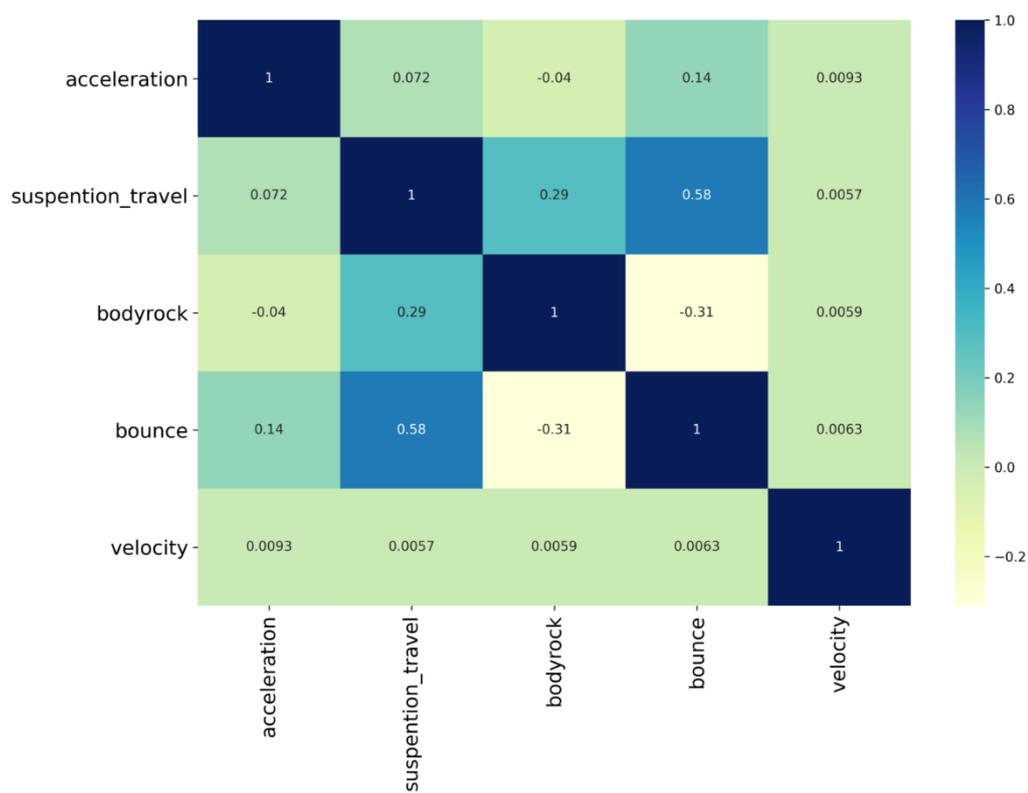


Figura 81 – Mapa de calor da correlação de Pearson para os atributos principais do VI para a viagem 7 no Trecho 1.

Logo, as análises descritivas para caracterizar a viagem 11 realizado em agosto são apresentadas seguindo a mesma metodologia anterior, iniciando-se com o gráfico de histogramas da Figura 82.

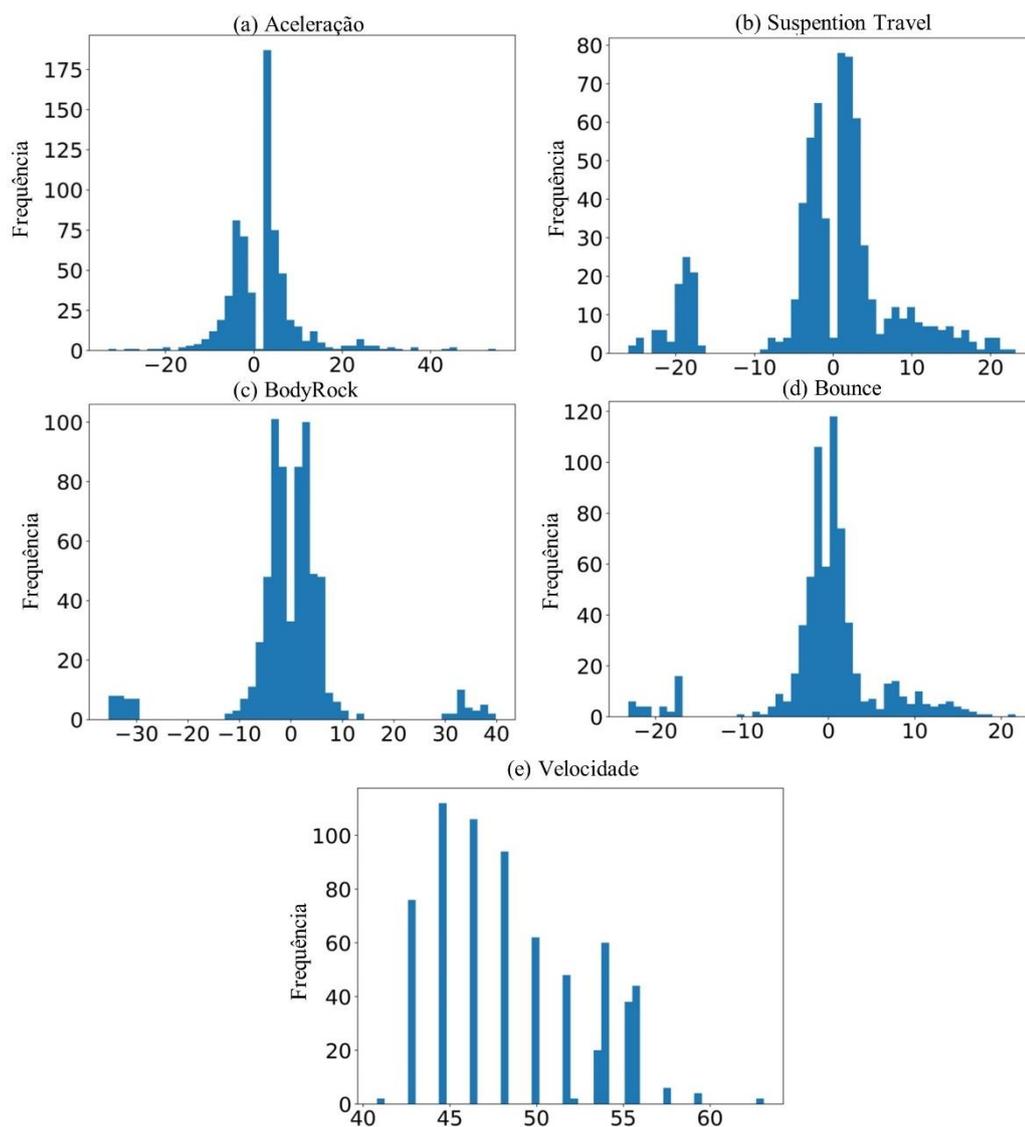


Figura 82 – Histogramas e para os parâmetros *Aceleração* (a), *Suspension Travel* (b), *BodyRock* (c), *Bounce* (d) e *Velocidade* (e) da viagem 11 do VI.

Nesta viagem a *Aceleração* (a), que mais aparenta ter comportamento similar graficamente, já para *Suspension Travel* (b), *BodyRock* (c) e *Bounce* (d), além de reafirmam o comportamento visto anteriormente, outros grupos destoantes de dados ficaram evidentes pelo gráfico. Os histogramas, portanto, apresentam mais de um modal e sem simetria. Esta viagem 11 não demonstra um comportamento próximo de uma distribuição normal.

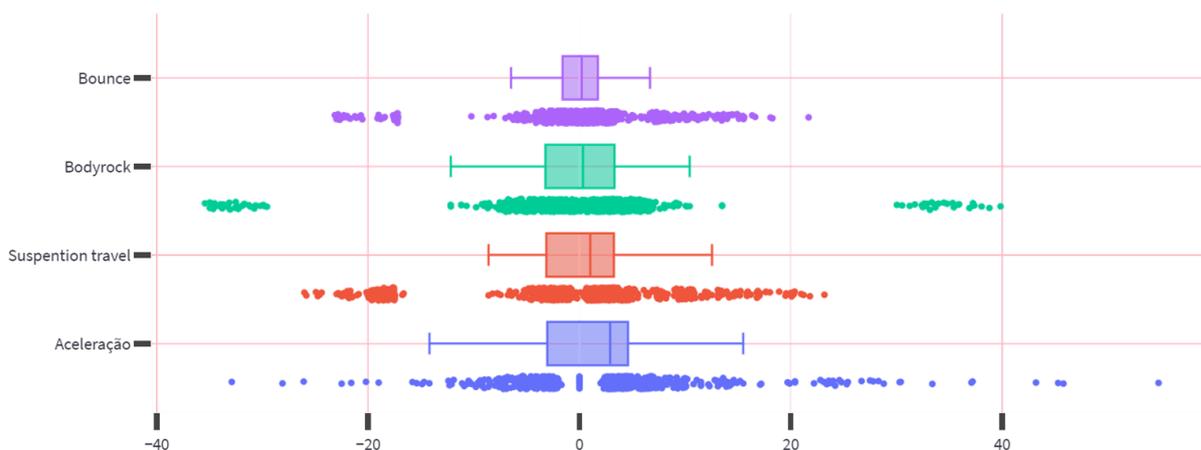


Figura 83 –*Boxplot* e pontos de distribuição dos registros para os parâmetros *Bounce*, *BodyRock*, *Suspention Travel* e *Aceleração* da viagem 7 do VI.

Nesta viagem 11 ficou visível a presença de pequenos agrupamentos de dados que destoam dos demais. No atributo *BodyRock* constatou-se dois conjuntos de registros, sendo um positivo e outro com valores negativos, mas de intensidades semelhantes. Para *Suspention Travel* e *Bounce*, coincidiram o comportamento dos *clusters* de *outliers* com a mesma intensidade, o que reafirma as correlações já constatadas nas análises anteriores. Já para a aceleração, pouco se alterou com relação aos gráficos anteriores. De maneira geral, os dados estão mais dispersos nesta amostra.

Com relação à avaliação de correlação de Poisson (Figura 84) observou-se novamente a relação mais intensa para este conjunto de dados da viagem 11, para os atributos *Bounce* e *Suspention Travel*. Esse aumento de 0,25 para 0,83 ao longo do ano de 2020 foi bastante interessante, já que justifica o comportamento demonstrado graficamente na Figura 83. Já para as demais variáveis houve decréscimo das correlações se aproximando de valores nulos.

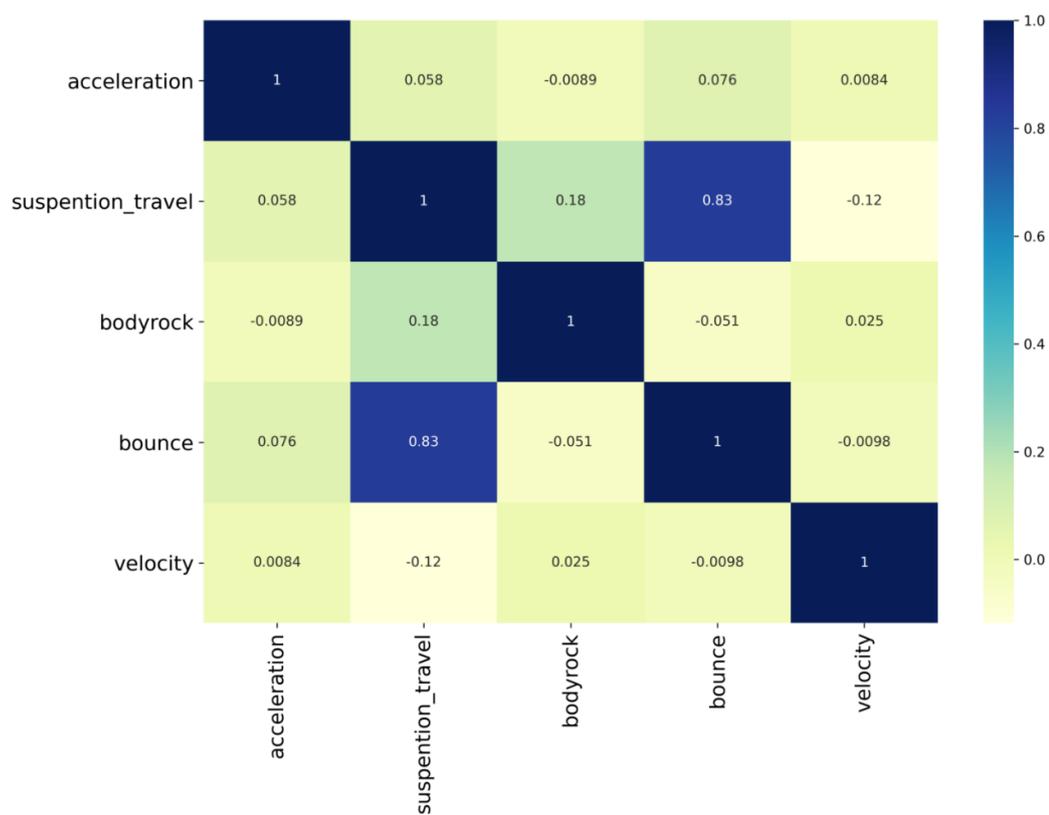


Figura 84 – Mapa de calor da correlação da ordem de posto de Pearson para a viagem 11 no Trecho 1.

APÊNDICE C – GRÁFICOS DADOS CALCULADOS PARA O MÉTODO SD

Mudanças no TQI, recalque da via e crescimento médio da irregularidade da via são considerados critérios para se avaliar a deterioração da via férrea. Neste trabalho, além de avaliar o segmento de 10 km com CoSD, avaliou-se o desvio padrão em blocos de 200 m conforme a EN 138488-5 (2008), para as medições realizadas no mês de julho, novembro e setembro. Portanto, para o presente apêndice são apresentados os cálculos realizados para os índices de qualidade da via SD.

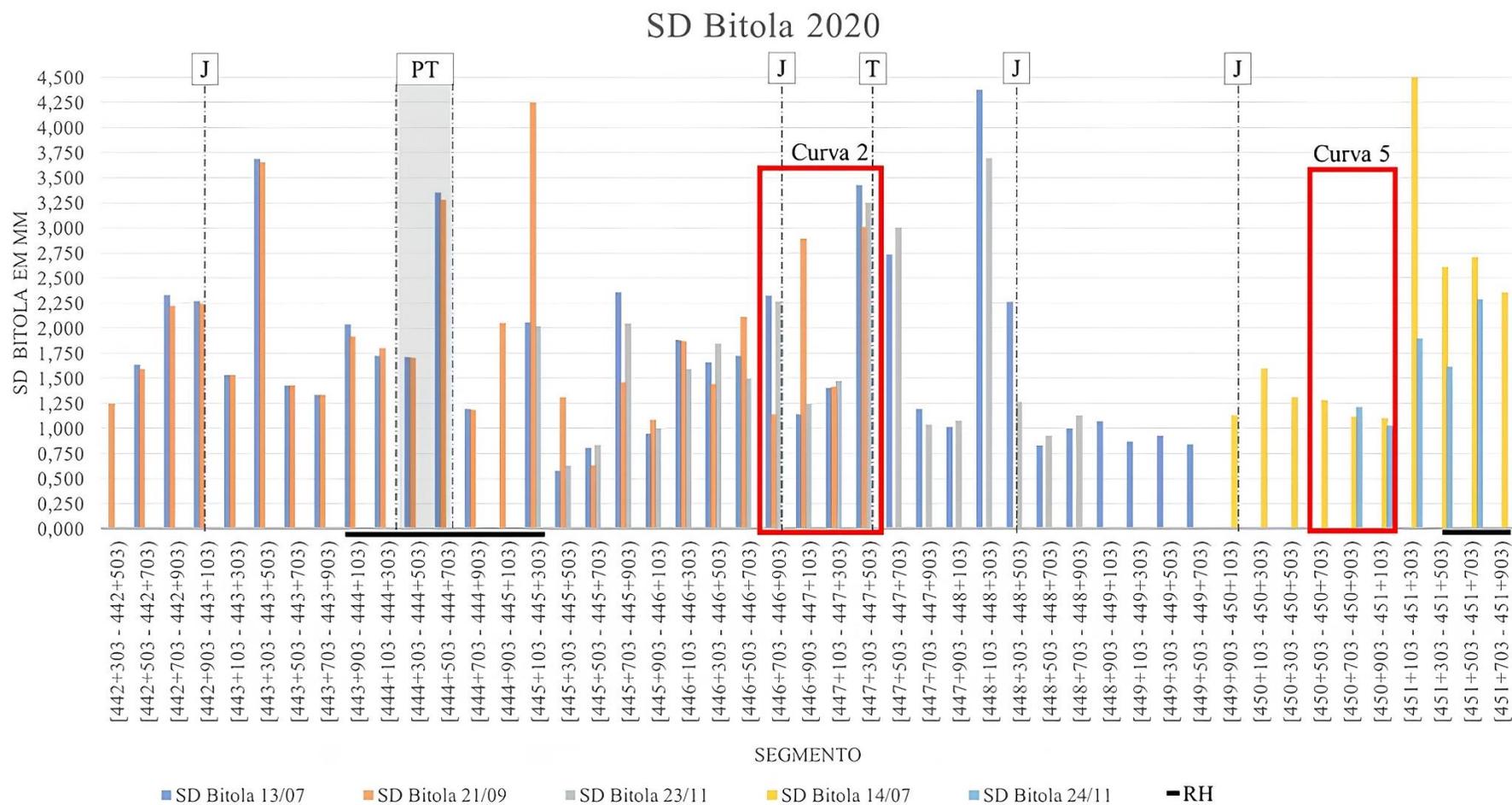


Figura 85 – Desvio padrão da bitola segundo o método (EN 13848,2008), em milímetros. Onde J (junta isolada colada), PT (ponte), T (travador)

SD Empeno 2020

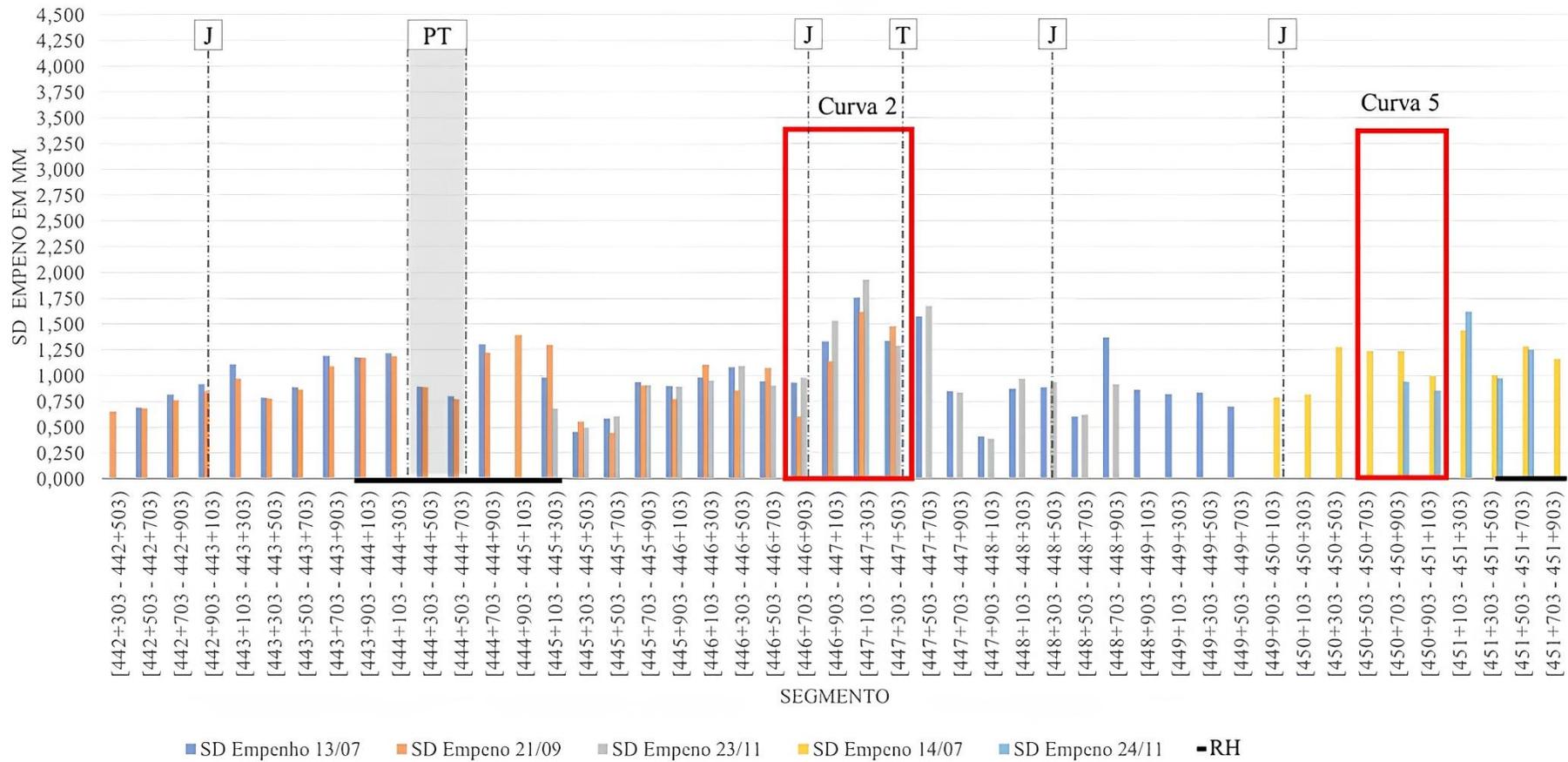


Figura 86 –Desvio padrão do alinhamento segundo o método (EN 13848,2008), em milímetros. Onde J (junta isolada colada), PT (ponte), T (travador).

SD Niv long 2020

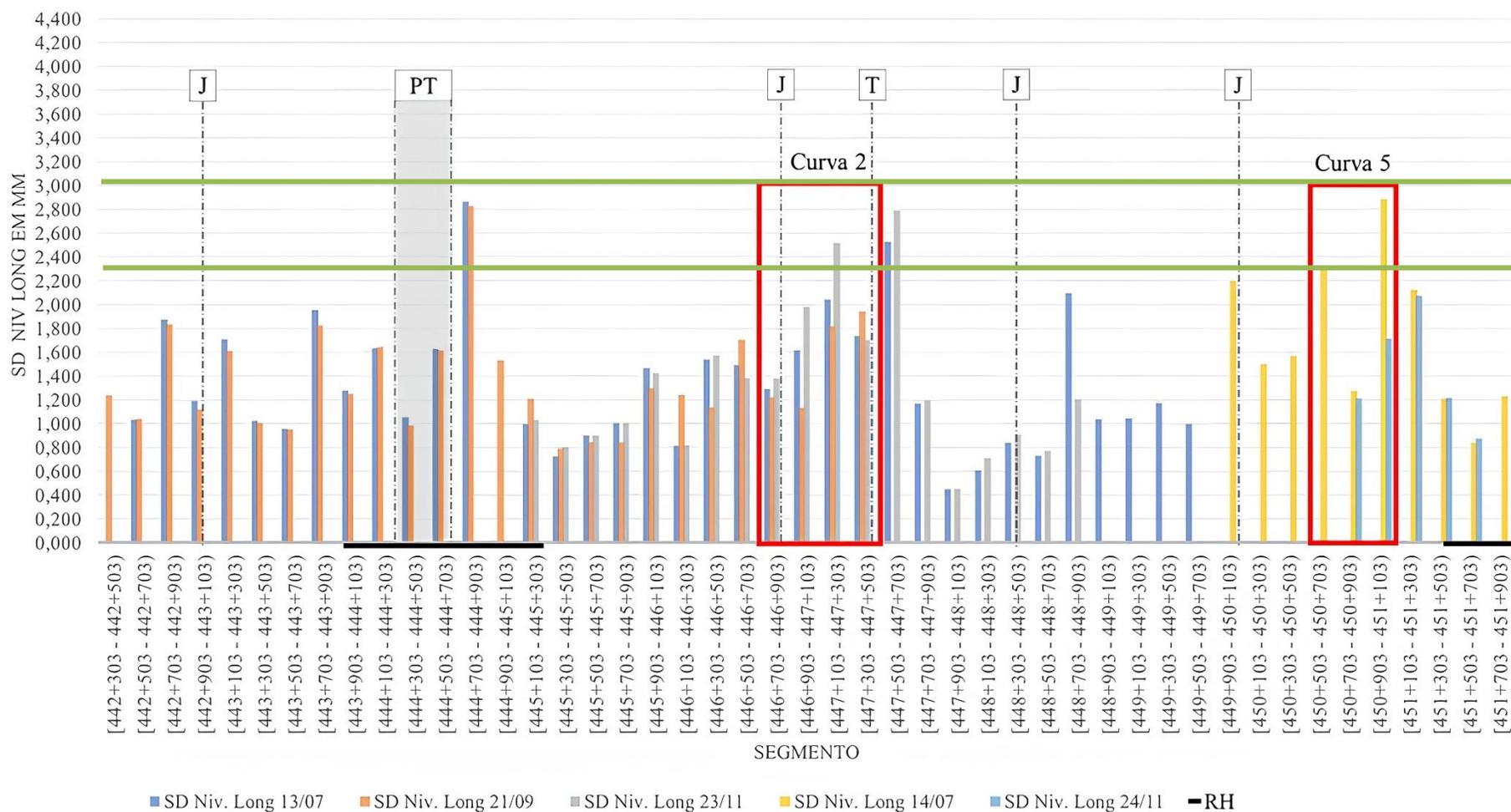


Figura 87 – Desvio padrão da média do nivelamento longitudinal do trilho esquerdo e direito segundo o método EN 13848 (2008), em milímetros. Onde J (junta isolada colada), PT (ponte), T (travador) e em verde a linha de referência para o intervalo limite definido em normativa europeia.

É apresentada, a seguir, uma análise resumida dos resultados das investigações realizadas empregando o método SD para todo o segmento.

- A) O segmento estudado tem elementos especiais, ou seja, ativos que possuem comportamento diferente quando comparado a linha corrida. São eles: junta isolada colada, aparelho de mudança de via, passagem de nível, ponte e travador. É de se esperar que nessas regiões, há desvios maiores nos parâmetros geométricos, por exemplo, quando a diferença de rigidez da via durante a passagem por esses ativos. O comportamento estrutural é diferente para essa condição, sendo assim pode mensurar valores não condizentes com a realidade da linha corrida de uma via lastreada;
- B) O trecho de 10 km se caracterizou por uma região mais degradada, é possível realizar a inferência devido à dispersão identificada em quase todos os atributos calculados. Como a via opera em velocidades inferiores comparada ao praticado na Europa, os valores de SD ainda se mantêm dentro dos limites. Destacaram-se os elementos Curva 2, Tangente 3 e RH68 para o parâmetro de nivelamento, uma vez que atingiram valores próximos ao limite;
- C) A normativa define os níveis de limite para SD de nível longitudinal e alinhamento lateral, mas não fornece diretrizes específicas para a irregularidade transversal. Observou-se uma notável dispersão na Curva 2 em relação a esse atributo;
- D) Os desvios para o atributo bitola se apresentaram em valores muito elevados em alguns blocos. Um fator que pode explicar esse comportamento é a propriedade dos dormentes de aço utilizados na EFVM, que permitem maior flexibilidade a deflexões do que comparado ao de concreto. Além disso, os desvios maiores foram encontrados em regiões de entrada/saída de curvas, já que o trilho externo sofre maior desgaste, bem como em áreas com aparelhos como travessões e AMVs, que têm características de geometria diferentes;
- E) Os blocos de 200 m para o cálculo do SD apresentaram em sua maioria valores muito próximos de 1 desvio. No entanto, alguns elementos apresentaram desvios superiores em comparação com os demais blocos. Em resumo, para o método SD, destacaram-se os seguintes elementos que merecem uma atenção especial para investigação mais aprofundada incluem: Curva 2, Curva 5, Tangente 3, Curva 3, Curva 6, Tangente 5 e Curva 9.

APÊNDICE D – GRÁFICOS DADOS CC PARA O SEGMENTO

São apresentados neste apêndice, como descrito anteriormente, os gráficos para os demais parâmetros de geometria da via para bitola métrica avaliados segundo a NBR 16387 (2016), a saber: nivelamento transversal, alinhamento, curvatura, todos em mm, para a Curva 5 e para a Curva 2 especificamente.

Adotou-se uma estratégia inicial de representação gráfica normalizada com o método z-score (Figura 88). O método baseia-se no cálculo da distância, em desvio padrão, cuja informação está em relação à média. Por meio deste artifício é possível verificar visualmente variáveis geométricas na mesma escala, o que ajuda a identificar atributos que possuem valores inconsistentes em relação aos demais.

É apresentada, a seguir, a análise gráfica dos resultados das investigações realizadas na Curva 5 em referência aos limites previstos na NBR 16387 (2016).

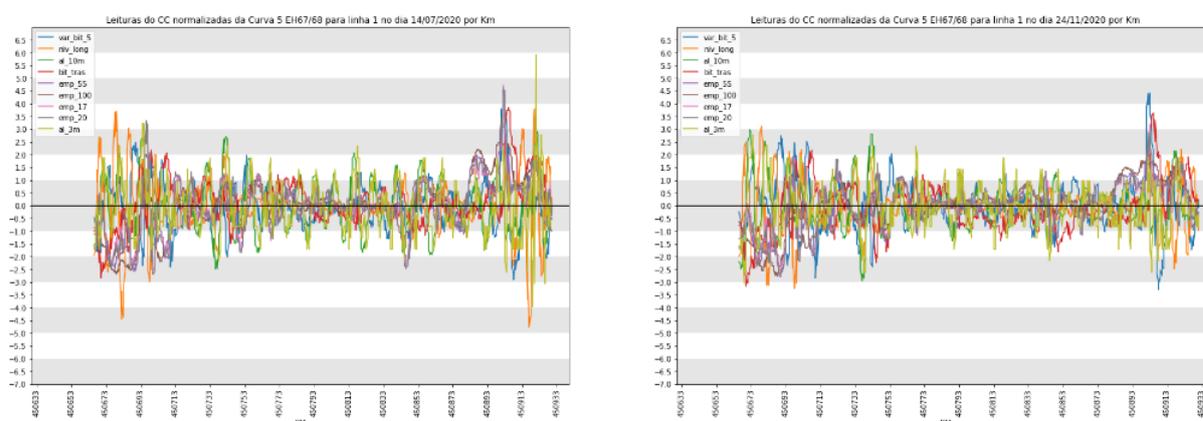


Figura 88 – Taxa normalizada dos parâmetros geométricos para a Curva 5, em milímetros, com faixas branca e cinza a cada 1 desvio padrão

Neste caso, avaliaram-se as viagens realizadas em julho e novembro para os parâmetros geométricos levantados com o CC para a Curva 5, a saber:

- I. Para a viagem realizada em julho destacam-se os seguintes pontos: na entrada da curva, um desvio significativo do parâmetro nivelamento longitudinal, enquanto na saída da curva, desvios notáveis no nivelamento transversal, na bitola e sua variação, que se aproximou de cinco desvios padrão. Além disso, tanto alinhamento e quanto nivelamento longitudinal apresentaram desvios de cerca de seis desvios padrão.

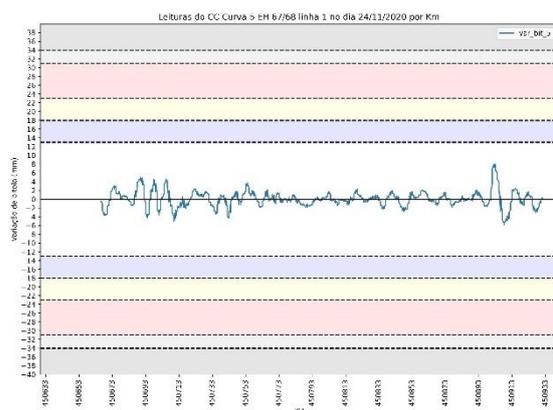
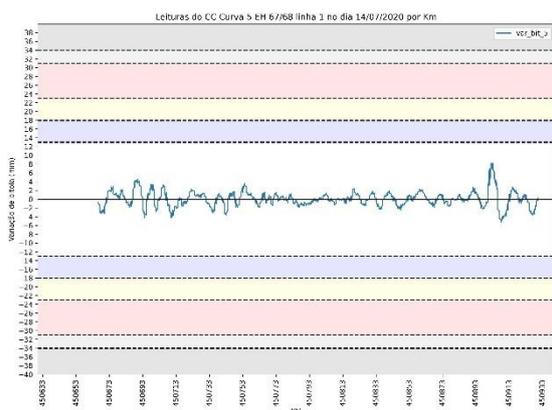


Figura 90 – Variação de bitola para a Curva 5, em milímetros, com referências aos limites estabelecidos pela NBR 16387 (2016) para bitola métrica representado em faixas da cor azul ao cinza escuro, sendo primeiro nível a faixa de maior velocidade autorizada (azul) até menor (cinza escuro)

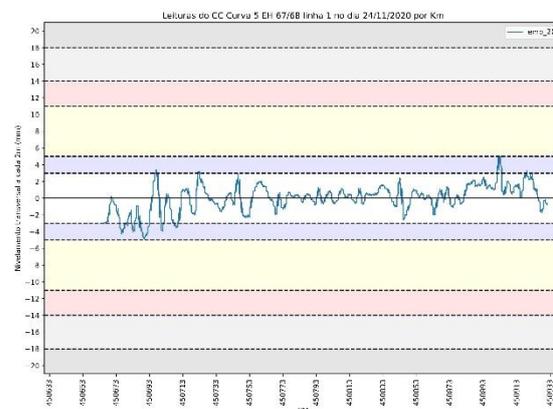
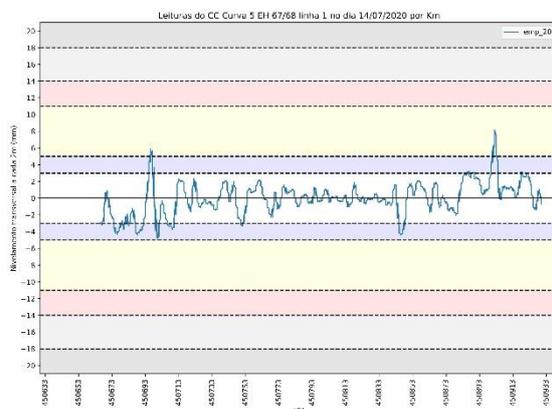


Figura 91 – Nivelamento transversal em corda de 2m para a Curva 5, em milímetros, com seus limites estabelecidos conforme a NBR 16387 (2016) para bitola métrica representado em faixas da cor azul ao cinza escuro, sendo primeiro nível a faixa de maior velocidade autorizada (azul) até menor (cinza escuro)

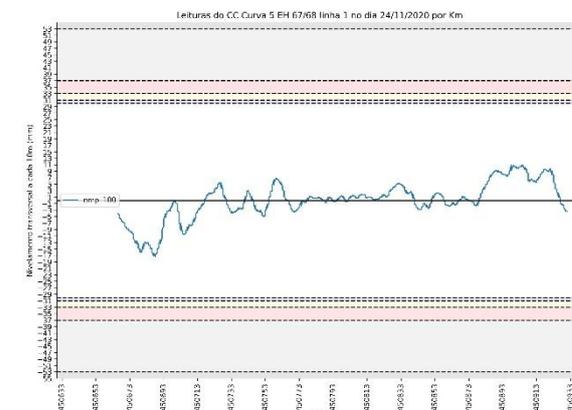
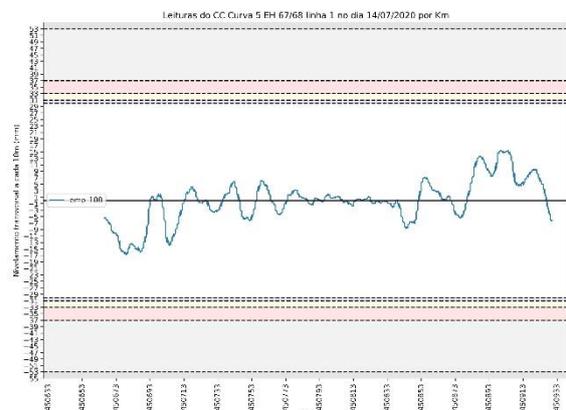


Figura 92 – Nivelamento transversal em corda de 10m para a Curva 5, em milímetros, com referência aos limites estabelecidos conforme a NBR 16387 (2016) para bitola métrica representado em faixas da cor azul ao cinza escuro, sendo primeiro nível a faixa de maior velocidade autorizada (azul) até menor (cinza escuro)

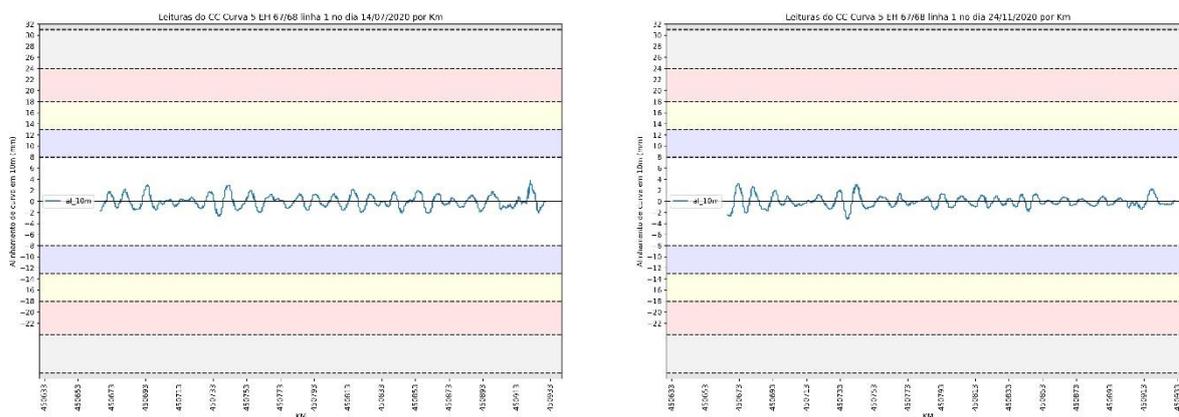


Figura 93 – Média do nivelamento longitudinal do trilho esquerdo e direito para a Curva 5, em milímetros, com referência os limites estabelecidos pela NBR 16387 (2016) para bitola métrica representado em faixas da cor azul ao cinza escuro, sendo primeiro nível a faixa de maior velocidade autorizada (azul) até menor (cinza escuro)

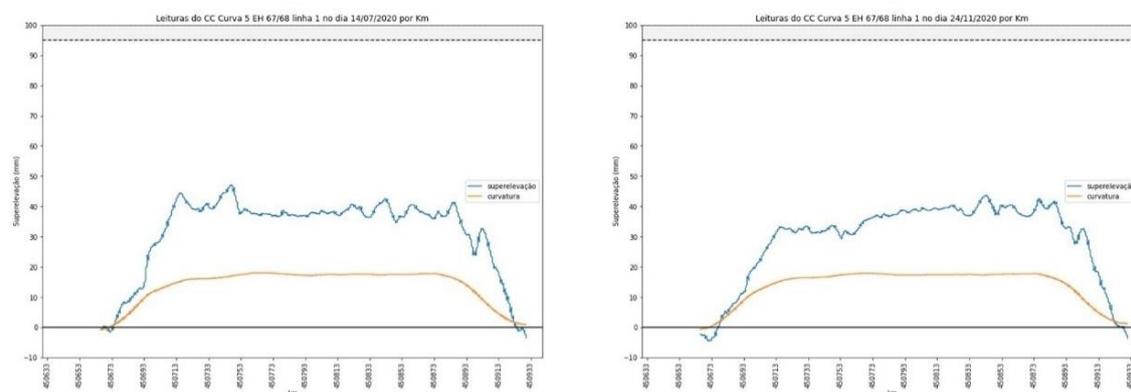


Figura 94 – Superelevação e curvatura da Curva 5, em milímetros, em referência aos limites estabelecidos conforme NBR 16387 (2016) para bitola métrica

Quando avaliado individualmente cada um dos parâmetros estabelecidos pela ABNT NBR 16387 (2016) (bitola, alinhamento, nivelamento transversal e curvatura) observou-se que, de maneira geral, estão adequados. No entanto, é importante destacar o comportamento do parâmetro de nivelamento transversal na corda de 2 m, onde os picos no início e no fim da curva excederam as primeiras faixas de restrições estabelecidas pela norma.

A princípio, parece ter ocorrido alguma ação de manutenção, pois esses mesmos pontos, na viagem subsequente, apresentaram valores de intensidade menores. No entanto, essas ações não corrigiram completamente o distúrbio presente, mas apenas o atenuaram.

Essas situações enfatizam a importância de um bom controle das atividades e inspeções periódicas da via. Essas informações são de extrema relevância para identificar a qualidade

dessas intervenções ou, mais acertadamente, para identificar a verdadeira causa do problema e tratá-la da forma mais adequada possível.

Outras pequenas perturbações no início e fim da curva ficaram bem visíveis para os parâmetros variação de bitola e nivelamento transversal em corda de 10 m. Embora essas perturbações sejam esperadas para áreas de entrada e saída de curvas, é importante observar que se encontram dentro dos limites estabelecidos pela norma, o que significa que não há necessidade de restrições ou mesmo de um nível de atenção elevado para um acompanhamento mais rigoroso.

Com relação às correlações entre os parâmetros da Curva 5, a Figura 95 mostra que existem baixas correlações entre as variáveis, exceto aquelas que medem o mesmo atributo apenas mudando a corda utilizada ou o mesmo critério de cálculo, como nivelamento longitudinal e nivelamento do trilho esquerdo e direito.

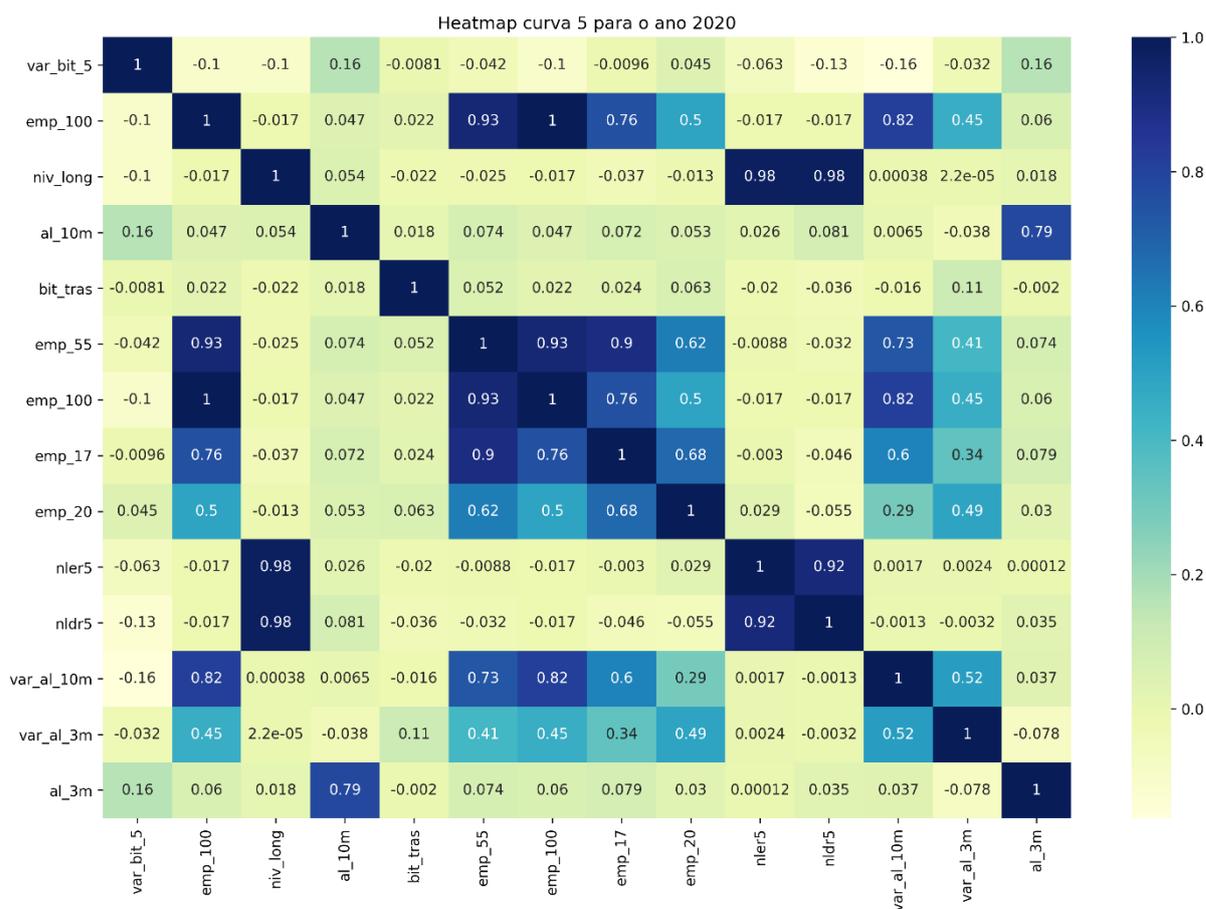


Figura 95 – Mapa de calor de correlação para os parâmetros do CC na Curva 5

É apresentada, a seguir, a análise gráfica dos resultados das investigações realizadas na Curva 2 em referência aos limites previstos na ABNT NBR 16387 (2016).

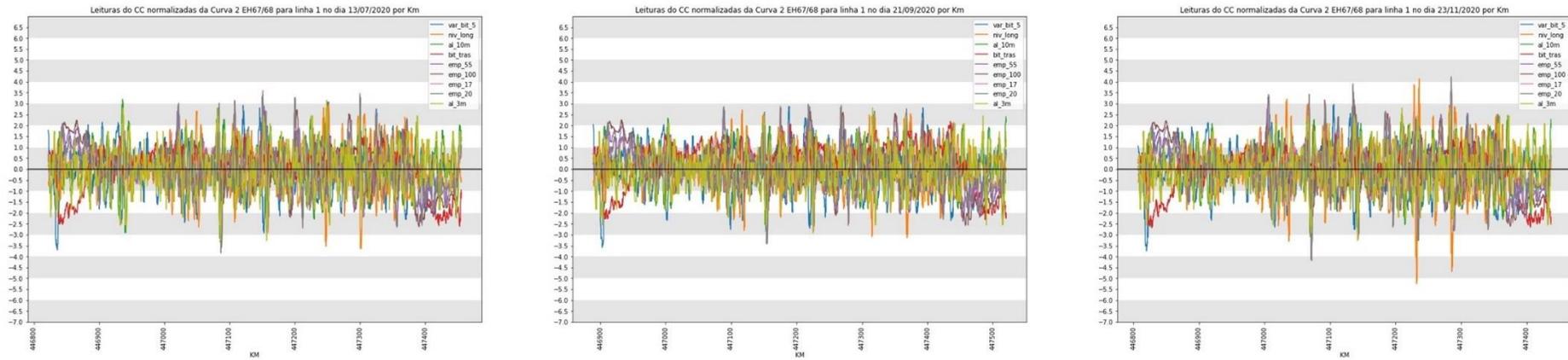


Figura 96 – Gráfico da taxa normalizada dos parâmetros geométricos da Curva 2, em milímetros, com faixas branca e cinza a cada 1 desvio padrão

As viagens nos meses de julho, setembro e novembro foram avaliadas por meio desta uma estratégia de pré-avaliação por meio de gráficos normalizados com a técnica z-score. Com relação aos parâmetros geométricos levantados com o CC, observou-se:

- I. Na viagem realizada em julho, destaca-se a variação existente para os atributos nesse elemento, especialmente em comparação com a Curva 5. Os atributos dentro da curva apresentam valores de desvio próximos a três, evidenciando um trecho com dados mais afastados da média do elemento e possivelmente mais degradado. Nesse sentido, é possível que os parâmetros geométricos estejam próximos ou acima dos limites admissíveis quando avaliados individualmente.
- II. Na viagem realizada em agosto, houve um pequeno decréscimo nos desvios dos atributos levantados. Ao avaliar as condições externas que poderiam ter afetado os resultados, concluímos que, devido à variação sutil, trata-se de uma variação natural entre levantamentos geométricos realizados pelo CC.

III. Na viagem realizada em novembro, destacam-se os parâmetros de nivelamento longitudinal e nivelamento transversal, nos quais há pontos em que seus desvios chegaram a cerca de cinco e quatro desvios, respectivamente. Para os demais parâmetros, a dispersão ao longo do tempo foi mantida.

A seguir, são apresentados nas Figura 97, Figura 98, Figura 99, Figura 100, Figura 101 e Figura 102 os gráficos para cada atributo do CC da Curva 2.

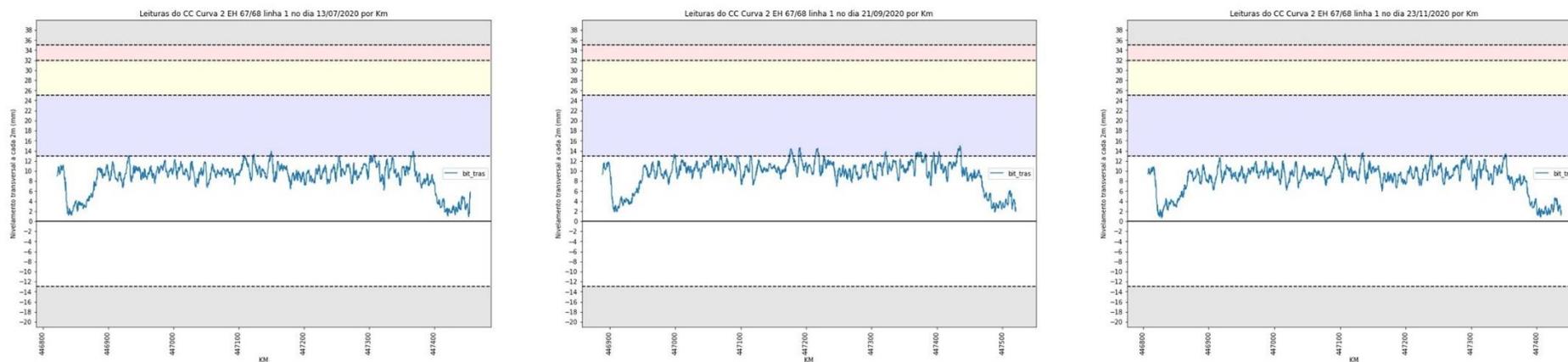


Figura 97 –Bitola para a Curva 2, em milímetros, com referência os limites estabelecidos conforme NBR 16387 (2016) para bitola métrica representado em faixas da cor azul ao cinza escuro, sendo primeiro nível a faixa de maior velocidade autorizada (azul) até menor (cinza escuro)

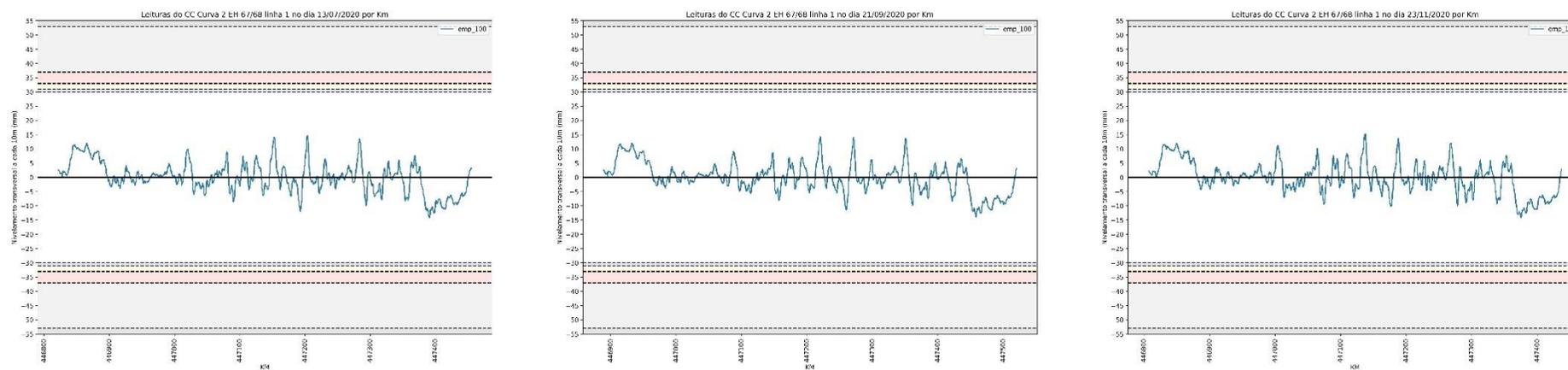


Figura 100 – Nivelamento transversal em corda de 10m para a Curva 2, em milímetros, com referência aos limites estabelecidos conforme a NBR 16387 (2016) para bitola métrica representado em faixas da cor azul ao cinza escuro, sendo primeiro nível a faixa de maior velocidade autorizada (azul) até menor (cinza escuro)

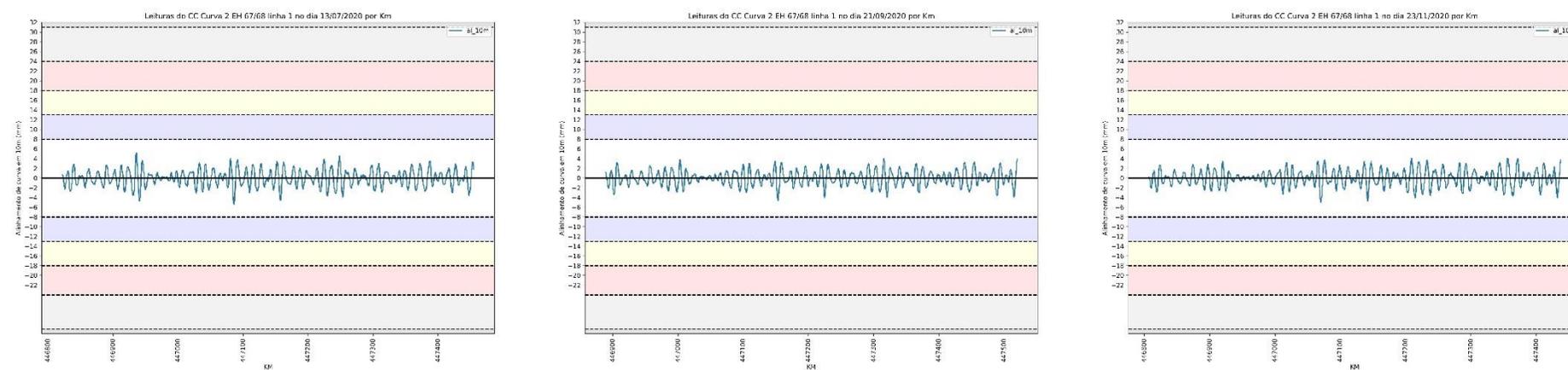


Figura 101 – Alinhamento em corda de 10 m para a Curva 2, em milímetros, com referência aos limites estabelecidos conforme a NBR 16387 (2016) para bitola métrica representado em faixas da cor azul ao cinza escuro, sendo primeiro nível a faixa de maior velocidade autorizada (azul) até menor (cinza escuro)

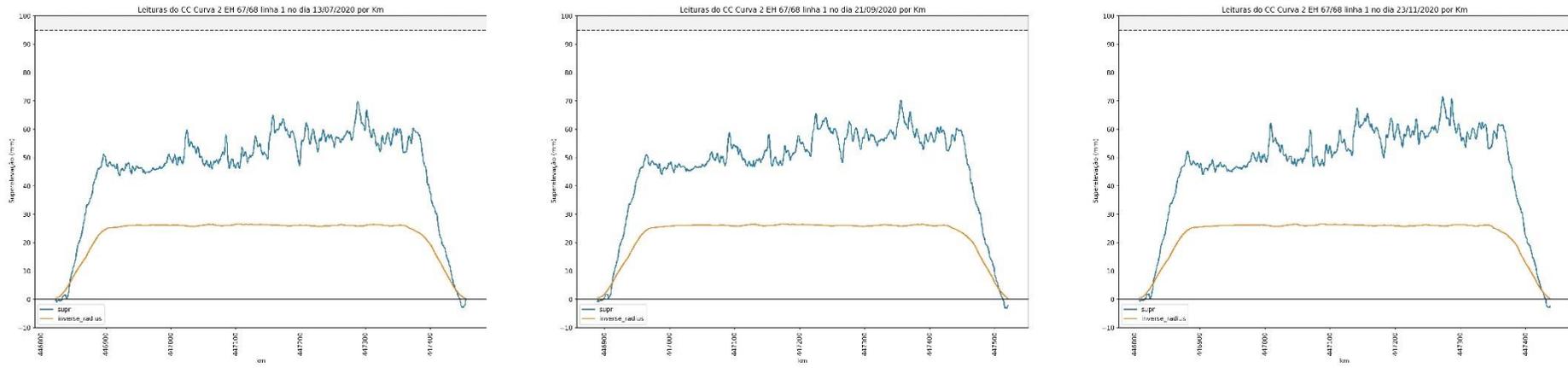


Figura 102 – Superelevação e curvatura em milímetros para Curva 2 com referência aos limites estabelecidos conforme a NBR 16387 (2016) para bitola métrica

Quando avaliado individualmente cada um dos parâmetros estabelecidos pela ABNT NBR 16387 (2016) (bitola, alinhamento, nivelamento transversal e curvatura) observou-se de forma geral, eles estão adequados. No entanto, o parâmetro da bitola apresenta casos que estão muito próximos do limite devido à maior velocidade permitida para o elemento. O atributo que mais se destaca é o nivelamento transversal em corda de 2 m. Em um segmento de cerca de 400 m, do quilômetro 447+000 ao 447+400, seus registros ultrapassam o segundo nível do limite admissível em função da velocidade máxima autorizada pela NBR (65 - 95 km/h). Para essa faixa de velocidade máxima autorizada, o parâmetro atinge picos superiores a 5 mm já na primeira viagem, com uma leve diminuição na viagem de setembro, mas retornando a valores ligeiramente maiores que os inicialmente levantados. Essa variação é um comportamento que se manteve constante nas viagens avaliadas, sendo visualmente mais perceptível para o nivelamento e a bitola. Como as composições da EFVM operam a uma velocidade de cerca de 60 km/h, não há restrições nas operações nessas condições.

Embora cada elemento tenha características diferentes devido a propriedades geométricas e de suporte distintas, nas situações das Curvas 2 e 5, há pouca diferença na correlação entre os atributos, conforme apresentado na Figura 103.

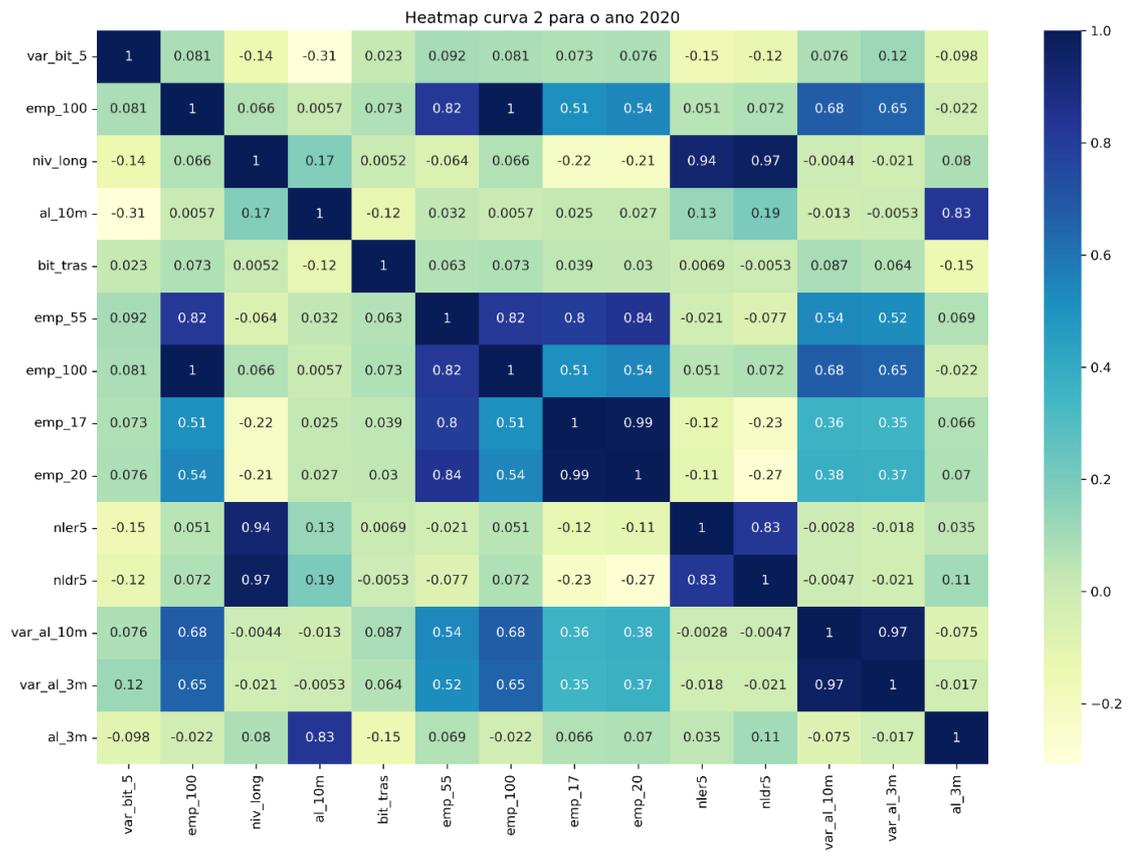


Figura 103 – Mapa de calor para correlação entre os atributos do CC para a Curva 2